

Großräumige Inventuren
mit Landsat-Erderkundungssatelliten
in der Schweiz

HABILITATIONSSCHRIFT

zur Erlangung der venia legendi

vorgelegt 1979 der
Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich

von

KLAUS I. ITTEN

von Spiez (Kt. Bern)

1981

Großräumige Inventuren
mit Landsat-Erderkundungssatelliten
in der Schweiz

HABILITATIONSSCHRIFT

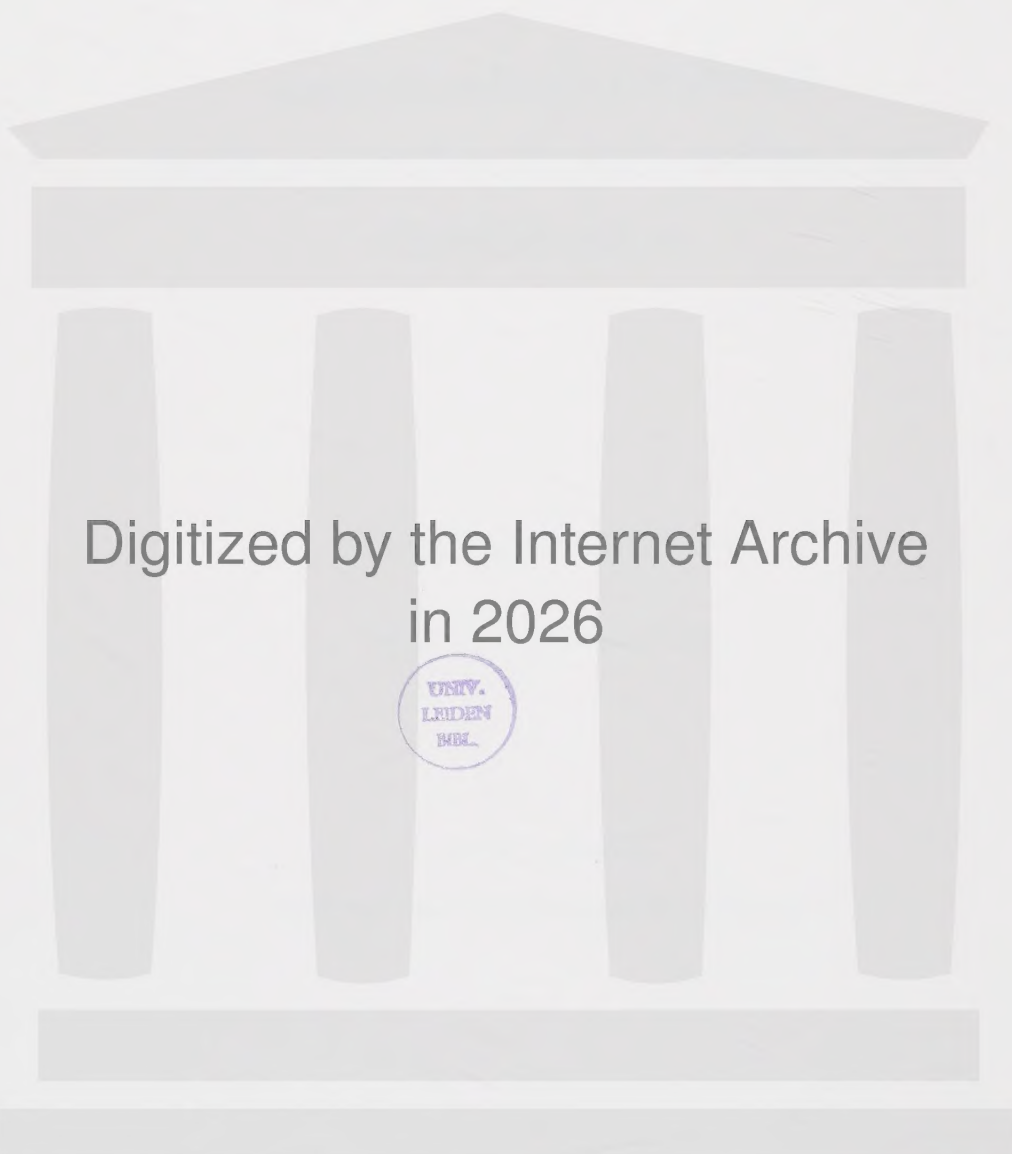
zur Erlangung der *venia legendi*

vorgelegt 1979 der
Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich

von

KLAUS I. ITTEN

von Spiez (Kt. Bern)



Digitized by the Internet Archive
in 2026



INHALT

1	Einleitung	9
1.1	Die Entwicklung	10
1.2	Ziele der Erderkundung	10
2	Satelliten für die Erderkundung	12
2.1	Satelliten-Fernerkundungssysteme	12
2.2	Die Landsat-Erderkundungssatelliten	14
2.3	Das Landsat-Multispektralscanner-Satellitenbild	17
3	Grundlagen der Bildanalyse	19
3.1	Analoge Verfahren der Bildanalyse	19
3.2	Digitale Bildverarbeitung	20
4	Beurteilung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten von Landsat-Klassifizierungen in der Schweiz	25
4.1	Anwendungsmöglichkeiten in der Hydrologie	25
4.1.1	Oberflächengewässer	25
4.1.2	Wasserqualität	25
4.1.3	Bodenfeuchtigkeit	25
4.1.4	Schnee und Eis	26
4.2	Anwendungsmöglichkeiten in der Land- und Forstwirtschaft	27
4.3	Anwendungsmöglichkeiten für die Überbauungsforschung	30
4.3.1	Vergleich einer Landsat-Klassifikation mit der Karte	30
4.3.2	Vergleich der Landsat-Klassifizierung des überbauten Gebiets mit dem Hektar-Informationsraster	40
4.4	Anwendungsmöglichkeiten für die thematische Kartographie	41
4.5	Übersicht über bestehende großräumige Inventuren in der Schweiz	42
4.5.1	Hydrologie	42
4.5.2	Land- und Forstwirtschaft	42
4.5.3	Überbauungsforschung	42
4.5.4	Allgemeine Landnutzung	43
4.5.5	Thematische Kartographie	43
4.6	Bisherige Arbeiten zur Landnutzungsklassifizierung mit Landsat-MSS-Daten in der Schweiz	43
4.7	Weltweite Verwendung von Landsat-Daten zu Landnutzungs-Inventuren	45
4.8	Allgemeine Gedanken zum Thema großräumiger Landnutzungs-Inventuren mit Landsat-Daten	45
5	Landnutzungsklassifikationen im Raume Zürich	46
5.1	Verwendetes Datenmaterial	46
5.2	Wahl der Methode	46
5.3	Praktisches Vorgehen bei der digitalen Verarbeitung	49
5.3.1	Stichprobenwahl im untersuchten Bereich	49
5.3.2	Statistik	49
5.3.3	Eigenschaftselektion	49
5.3.4	Klassifikation	49
5.3.5	Genauigkeit	50
5.4	Beurteilung der Probleme beim Klassifizieren digitaler Landsat-Bilder	54
5.4.1	Problem Wasser	54
5.4.2	Probleme mit den Klassen „locker“ und „dicht überbaut“	55
5.4.3	Problem Wald	57
5.4.4	Probleme mit den Klassen „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“	59

5.4.5	Probleme der Homogenität des Datenmaterials — aufnahme- seitig	59
5.4.6	Atmosphärische Störungen	60
5.5	Einschränkungen der Anwendung von Landsat-Daten	63
6	Darstellung der Resultate der Landsat-Landnutzungsklassifika- tion	64
6.1	Automatische Generalisierungsprozesse bei klassifizierten Landsat- Bildern	64
6.1.1	Allgemeine Bemerkungen zu Filter-Generalisier-Techniken und ihrer Anwendung	65
6.1.2	Strategie des Filterns	66
6.1.3	Beschreibung der Filterelemente und der angewendeten Filter ...	67
6.1.4	Klassifikationsstatistik	72
6.1.5	Der Generalisierungsgrad	72
6.2	Praktische Möglichkeiten der bildhaften Gesamtdarstellung der Klassifikationsresultate	74
6.2.1	Schwarzweiß-Halbton-Darstellung	76
6.2.2	Schwarzweiße Raster/Strich-Darstellung	78
6.2.3	Farbige Darstellung	80
7	Wertung der durchgeführten Untersuchungen	82
	Zusammenfassung	83
	English Summary	83
	Literaturverzeichnis	84
	Abbildungsquellen	85
	Dank	86

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TABELLEN

ABBILDUNGEN

1	Gliederung des elektromagnetischen Spektrums	12
2	Aufnahmesystem des Landsat-Multispektralscanners	16
3	Geometrische Verzerrungen bei Landsat-MSS-Bildern	17
4	Aufbau eines Landsat-MSS-Bildes	18
5	Schematische Darstellung des analogen Bildanalyseprozesses	19
6	Schematische Darstellung des digitalen Bildverarbeitungsprozesses	20
7	Spektrale Reflexion zweier Oberflächentypen	21
8	Meßpunktlagen in der Eigenschafts- oder Variablenebene λ_2/λ_4	21
9	Lage der Lerngruppen in der Variablenebene λ_2/λ_4	21
10	Beispiele von Zuordnungskriterien zur Klassifikation multispektraler Datensätze	22
11	Beispiel einer Gruppierung in drei Cluster	23
12	Ablauf einer digitalen Bildverarbeitung nach dem LARSYS-Prinzip	24
13	Verwendung von Satellitendaten mit anderen Quellen in einem Abfluß-Prognosemodell	26
14	Korrektur von Abflußmodellrechnungen durch Aufdatieren mit Hilfe von Satellitenmessungen	27
15	Landsat-Klassifikation vegetationsloser Flächen in der Reussebene im Raum Jönköping-Merenschwand im Vergleich mit der Landeskarte 1 : 100 000	28
16	Landsat-Klassifikation der Klassen „Nadelwald“, „Laubwald“ und „Wasser“ im Vergleich mit einer Waldkarte der Eidg. Landestopographie im Maßstab 1 : 200 000	29
17	Vergleich einer Landsat-Klassifikation der Klassen „dicht überbaut“, „locker überbaut“ und „Wasser“ mit dem Blatt „Landwirtschaft I“ des „Atlas der Schweiz“, Maßstab 1 : 500 000	31
18	a) Ausschnitt aus der Landeskarte 1 : 200 000, Blatt II	32
	b) Landsat-Klassifikation 1 : 200 000, Raum Rhein-Zürich-Zug, Klassen „dicht überbaut“, „locker überbaut“ und „Wasser“	33
19	a) Ausschnitt aus der Landeskarte 1 : 100 000, Blatt Beromünster	34
	b) Landsat-Klassifikation 1 : 100 000, Raum Zürich, Klassen „dicht überbaut“, „locker überbaut“ und „Wasser“	35
20	a) Ausschnitt aus der Landeskarte 1 : 50 000, Blatt Zürich	36
	b) Landsat-Klassifikation 1 : 50 000, Stadt Zürich, Klassen „dicht überbaut“, „locker überbaut“ und „Wasser“	37
21	a) Ausschnitt aus der Landeskarte 1 : 25 000, Blatt Winterthur	38
	b) Landsat-Klassifikation Stadt Winterthur, Klassen „dicht überbaut“ und „locker überbaut“	39
22	Vergleich eines Ausschnitts aus dem ORL-Informationsraster mit einer Landsat-Klassifikation im Raum Zürich für die Klassen „Wasser“ und „überbautes Gebiet“	40
23	Lage des verwendeten Aufnahmeausschnitts innerhalb des Landsat-Bildes E-1076-09440	46
24	Verwendeter Aufnahmeausschnitt, Wiedergabe der Landsat-MSS Kanäle 5 und 7	47
25	Interaktives Bild-Interpretationssystem (IBIS) — Schema der Verarbeitungsfunktionen	48
26	Trennkanalmatrix	50
27	Erfassung des überbauten Gebietes in Luftbild, Landsat-Bild, Landsat-Klassifikation, Karte und ORL-Informationsraster, Raum Zürich Nord, Maßstab 1 : 100 000	52
28	Erfassung der Waldfläche in Luftbild, Landsat-Bild, Landsat-Klassifikation, Karte und ORL-Raster, Raum Albis-Reppischtal, Maßstab 1 : 100 000	53
29	Grauprint-Darstellung der Katzensseen (ZH) im Landsat-Kanal 7	54
30	Landsat-Klassifikation der Stadt Zürich nach dem „Maximum likelihood“-Verfahren	55
31	Histogramme der Klassen „dicht überbaut“ und „locker überbaut“	56
32	Histogramme der Klassen „Nadelwald“ und „Laubwald“	58
33	Darstellung von Fehlklassifizierungen in überbauten Gebieten	58
34	Histogramme der Klassen „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“	59
35	Histogramm eines Bildausschnittes im Landsat-Kanal 7	60
36	Histogramme der Klasse „Nadelwald“	60
37	Landsat-Klassifikation des gesamten Bildausschnittes	61
38	Intensitätsunterschiede von Wasserflächen in den vier Landsat-Kanälen als Funktion ihrer Höhenlage	62

39	Filterung bei der Klasse „Wasser“	67
40	Filterung bei der Klasse „dicht bebaut“	67
41	Filterung bei der Klasse „locker überbaut“	68
42	Filterung bei der Klasse „Nadelwald“	69
43	Filterung bei der Klasse „Laubwald“	69
44	Filterung bei der Klasse „grüne Vegetation“	70
45	Filterung bei der Klasse „vegetationslos“	71
46	Filterung bei der Klasse „nicht klassifiziert“	72
47	Original-Landsat-Klassifizierung der locker bebauten Flächen im Raum Zürich mit Filter- Generalisierungen und Äquidensiten	73
48	Übersicht über den digitalen Bildanalyseprozeß und die Möglichkeiten der bildhaften Ge- samtdarstellung der Klassifikationsresultate	75
49	Photographische Graustufendarstellung der Landsat-Landnutzungsklassifikation, Raum Zürich, Maßstab 1 : 100 000	77
50	Experimentaldarstellung der Landsat-Landnutzungsklassifikation nach der Raster-Strich- Methode, Raum Zürich, Maßstab 1 : 100 000	79
51	Farbige Darstellung der Landsat-Landnutzungsklassifikation, Raum Zürich, Maßstab 1 : 200 000	81

TABELLEN

1	Einrichtungen zur Messung elektromagnetischer Strahlung von Satelliten aus	12
2	Übersicht über amerikanische und europäische Erderkundungssatelliten und -projekte ..	15
3	Flächenvergleich: Luftbild — Karte — ORL-Raster — Satellitenbild	51
4	Einfluß der Änderung der Prioritätsrangfolge auf die Klassenflächenanteile	66
5	Veränderungen der Klassifikationsstatistik durch die 3 × 3-Filterung	72

1 Einleitung

Die ökonomische Nutzung unseres Lebensraumes bedarf der Kontrolle und Planung. Konventionellen Methoden zur Beschaffung von hierzu geeigneten Basisinformationen wie Befragungen, Stichprobenerhebungen, Statistiken sowie herkömmlichen Kartierungen stehen heute in gewissen Bereichen der Erkennung und Überwachung natürlicher Ressourcen neue Möglichkeiten durch die Satelliten-Erderkundung gegenüber.

Der große Nutzen dieser neuen Techniken zur großräumigen Erfassung und Darstellung ist in weniger gut kartographisch erfaßten Entwicklungsländern unbestritten. Erfolgreiche Anwendungen im geologischen Explorationsbereich, in land- und forstwirtschaftlichen Inventuren, im Überwachen dynamischer hydrologischer Prozesse etc. bestätigen dies aber auch für unsere „Breiten“ und in hochtechnisierten überwachten Bereichen.

Es ist bei uns, wo oft traditionelles Denken in „gewachsenen“ Institutionen zur Kartierung oder Erstellung von Statistiken nach konventionellen Methoden anzutreffen ist, nicht leicht, entgegen dem gewohnten Präzisionsdenken neue Methoden einzuführen. Es wird hier aber nicht versucht, konventionelle Methoden zu kritisieren und total durch die Satellitenbildanalyse zu ersetzen. Ziel dieser Untersuchungen soll es vielmehr sein, Hinweise zu geben, in welchen Teilbereichen und mit welchen Techniken gewisse Aspekte der großräumigen Inventarisierung bearbeitet werden können. Dies bezieht sich auf den Zeitpunkt Ende 1978. Wo möglich, werden auch Hinweise gegeben auf die zu erwartende Entwicklung.

Man sollte die Vorteile zu nutzen versuchen, die durch die neuen Mittel der Satellitenerkundung gegeben sind. Nach relativ hohen Kosten für Entwicklung, Bau und Start des Satelliten bleibt dieser für Jahre in Betrieb und verursacht dann geringe operationelle Kosten.

Ein großer Vorteil von Satellitenaufnahmen ist die synoptische Darstellung größerer Räume, die mit konventionellen Mitteln nicht oder nur näherungsweise erreicht werden kann. Auch globale Untersuchungen sind heute in vielen Bereichen durchführbar geworden.

Ist der Satellit einmal im Orbit, so können wiederholte Bedeckungen eines größeren Aufnahmegebietes erhalten werden, um einerseits das Erfassen

dynamischer Vorgänge zu ermöglichen und andererseits dem Bewölkungsproblem auszuweichen. Aus ökonomischen Gründen ist dies mit konventionellen Verfahren nur sehr kleinräumig möglich.

Diesen Vorteilen stehen gewisse Nachteile gegenüber: Zur Lösung gewisser Fragestellungen ist eventuell das beschränkte Auflösungsvermögen nicht ausreichend. Ist der Satellit einmal gestartet, so lassen sich keine Spezialwünsche betreffend der Spektralbänder mehr realisieren. Für das optimale Ausnutzen der Meßdaten sind relativ teure technische Geräte und Verfahren zur Vorverarbeitung und Verarbeitung notwendig, obwohl zum Teil auch konventionelle Bildinterpretationsmethoden eingesetzt werden können.

Viel zu viel ist anfangs versprochen worden. Alles wollte man mit diesen Daten erklären und beschreiben können, was sich auf der Erdoberfläche manifestiert.

Eine gewisse Ernüchterung hat heute gegenüber der Euphorie Platz genommen, eine, wie mir scheint, gesunde Entwicklung. Man sollte jetzt nur nicht ins extreme Gegenteil verfallen und der Forschung wegen den damaligen zu großen Versprechungen die finanzielle Basis entziehen. Denn ganz allgemein wird heute doch versucht, sorgfältig abzuklären, in welchen Teilbereichen der Erdwissenschaften ein wirklicher Nutzen erzielt werden kann. Man sollte dabei nie vergessen, daß auch beispielsweise die spürbare Verbesserung der Wetterprognosen nicht bereits kurz nach dem Start der ersten Wettersatelliten im Jahre 1959 eintraf!

In diesem Sinne soll die vorliegende Arbeit betrachtet werden — ein Versuch zur Objektivierung der operationellen Möglichkeiten der Anwendung von Landsat-Erderkundungs-Satelliten-daten in unserem Raum, unter dem Aspekt unserer speziellen, landeseigenen Probleme.

Bei der vorgenommenen Diskussion der Möglichkeiten kann aber kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden.

Wir finden in einer Dreigliederung:

- Im ersten Teil allgemeine Einführungen in die Themen Satelliten für die Erderkundung, Satellitensysteme und Aufnahmesysteme sowie

eine kurze Vorstellung von Landsat und den multispektralen Satellitenaufnahmen.

- Im zweiten Teil werden die Grundlagen der Bildanalyse dargestellt, ihre generellen Möglichkeiten und Einschränkungen sowie ihre Vor- und Nachteile beschrieben.
- Im dritten Teil werden schließlich die Probleme und Erfahrungen bei der Anwendung von speziellen digitalen Methoden der Satellitenbildanalyse an praktischen Fragestellungen der Hydrologie, der Land- und Forstwirtschaft, der Besiedlungsforschung und allgemein der thematischen Kartographie diskutiert und anhand eines praktischen Beispiels einer Landnutzungsklassifikation des Raumes Zürich demonstriert. Dieser Teil wird vervollständigt durch ein Kapitel über die Darstellung der erzielten Resultate sowie eine kritische Wertung der durchgeführten Untersuchungen.

1.1 Die Entwicklung

Mit dem Start von Sputnik-1 am 4. Oktober 1957 begann das Zeitalter der Raumfahrt. Aufgeschreckt durch diese Leistung folgten auf amerikanischer Seite große Anstrengungen, auf diesem Gebiete gleichzuziehen – gipfelnd in der Rede von *Kennedy* 1961, daß noch im selben Jahrzehnt ein Amerikaner den Mond betreten solle!

Eine außergewöhnliche Geschichte der forcierten Entwicklung der Raumfahrt-Technologie setzte darauf in den USA und der UdSSR ein.

In Europa gingen Forschung und Entwicklung vor allem nationale Wege, da die ELDO mit ihrem Trägerfahrzeug EUROPA-1 keinen Erfolg hatte. Erst heute, nachdem verschiedene Länder ihre nationalen Satelliten z. T. mit russischen (Frankreich) oder amerikanischen Raketen (Deutschland, Italien, Großbritannien etc.) lanciert haben, sind sie vermutlich der Kostenexplosion wegen eher zur Zusammenarbeit innerhalb der ESA (European Space Agency, früher ESRO) bereit. Erste Erfolge stellten sich bereits ein (Bpl. Meteosat). Inzwischen gibt es u. a. japanische, chinesische und indische Satelliten.

Am 20. Juli 1969 war es soweit. Nach einer ganzen Serie von unbemannten Ranger- und Surveyor-Sonden, sowie dem bemannten stufenweisen Raumfahrtprogramm von Mercury über Gemini zu Apollo, landete Apollo-11 auf dem Mond, und die beiden ersten Menschen, Armstrong und Aldrin, betraten Mondboden. Mit weiteren Apollo-

missionen (Nr. 12, 14, 15, 16 und 17) wurde die Mondforschung fortgesetzt.

Auf russischer Seite „begnügte“ man sich mit weichen Landungen von Raumsonden der Typen Lunik und Luna und der Erforschung unseres Trabanten mit Hilfe von Mondfahrzeug-Robotern „Lunochod“.

Seither ist es im Sektor der Raumfahrt etwas stiller geworden. Die ungeheuren Kosten des Mondforschungsprogramms, die der amerikanische Steuerzahler nicht mehr gewillt war zu tragen, sind mit ein Hauptgrund dafür. Aufwand und Ertrag waren in ein undurchschaubares Ungleichgewicht geraten.

Die Folge davon war eine ganz allgemeine Hinwendung zu Problemen der Erderkundung. Verstärkt wurde sie durch die Umweltschutz-Euphorie der frühen 70er Jahre, unterstützt auch durch den Bericht des „Club of Rome“ zu den sich verknappenden Rohstoffen, ebenso wie durch weltweite Ernährungsprobleme der sich rapide vermehrenden Erdbevölkerung.

Erdbeobachtung ziviler wie militärischer Art hat es seit den Anfängen der Raumfahrt gegeben. Zu den ersten operationell und ökonomisch funktionierenden Systemen gehörten die Wettersatelliten – Nachrichtenquellen, ohne die wir heute schwerlich auskommen würden.

1.2 Ziele der Erderkundung

Aus dem weiten Spektrum der Ziele seien einige Fachrichtungen mit ihren Schwerpunkten auf dem Gebiete der Erderkundung herausgegriffen.

Land- und Forstwirtschaft:

Verbesserung der agrarischen Planung und des Marketings durch präzise Schätzung von Erträgen und Ernten.

Vergrößerung der Erträge durch gezielte Bodenforschung und optimale Wasserbewirtschaftung.

Verringerung der Verluste durch Früherkennung von Schädlingen und Pflanzenkrankheiten.

Ozeanographie:

Verbesserung der Fischerei-Produktion durch Lokalisierung von Kaltwasser-Aufstößen, planktonreichen Zonen und optimalen Temperaturbedingungen.

Planung von Seerouten durch Messen des Seeganges, Aufspüren von Navigationshindernissen und Beobachten von Meereis.

Erweiterung der technischen Entwicklungsmöglichkeiten durch Kontinental-Schelfforschung, z. B. durch die Kartierung der küstennahen submarinen Topographie.

Entdeckung von Umweltgefährdungen und Ermittlung der Ursachen.

Hydrologie:

Inventarisierung der Wasservorräte für eine optimale Wasserbewirtschaftung.

Auffinden neuer Frischwasserquellen, Grundwasser-Erforschung.

Überwachung des „Gesundheitszustandes“ von Seen.

Prognose und Warnung vor Überschwemmungen.

Geologie:

Feststellen und Kartieren von geologischen Formen, die auf mineralische Bodenschätze schließen lassen.

Überwachung von Vulkanen, Erdbeben, Küstenerosionen und Flußsedimentationen.

Zusammenfassend kann man festhalten, daß es um die Bestandsaufnahme und Klassifizierung menschlicher Aktivitäten und Bedürfnisse geht, durch Beschaffung von Forschungsgrundlagen und Daten sowie um die Förderung des Verständnisses der physisch-geographischen Gegebenheiten zur Verbesserung der Planung und Steuerung der ruralen wie urbanen Entwicklung.

paare von Spektral-Aufnahmen ist mit enormen Schwierigkeiten verbunden.

Vidicon-TV-Systeme haben den Vorteil, daß die sequentiellen elektrooptischen Signale entweder direkt übermittelt oder analog aufgezeichnet und später im Bereich einer Bodenempfangsstation telemetriert werden können. Mit den Nimbus- und TIROS-Forschungs-Satelliten wurden solche Systeme u. a. auch in trimetrogoner Stellung erprobt und später mit großem Erfolg in den operationellen ESSA-Wettersatelliten verwendet.

Nachteile der Vidicons sind die geringere Auflösung gegenüber photographischen Systemen, sowie ähnlich wie beim Film der beschränkte spektrale Empfindlichkeitsbereich (0,35–1,1 μm). Hinsichtlich der Auflösung sind durch die Verwendung von Array-Silikon-Vidicons allerdings in letzter Zeit sehr große Fortschritte gemacht worden.

Radiometer und abtastende Radiometer sind Strahlungsmessgeräte, mit denen auf Distanz punktweise, oder bei Bewegung der optischen Achse linienweise Messungen der elektromagnetischen Strahlung gemacht werden können. In Satellitenanwendungen finden wir Radiometer vom uv-Bereich bis zu den Mikrowellen. Wie schon dem Namen innewohnt, geht es bei Radiometer-Messungen um Genauigkeit der Messung im quantitativen radiometrischen Sinn sowie qualitativ in sehr genau definierten Spektralbereichen. Die räumliche Verteilung der Meßwerte ist weniger von Bedeutung. Etwas Verwirrung in der Namensgebung haben allerdings verschiedene bildformende abtastende Radiometer gebracht, die sowohl radiometrisch als auch geometrisch hohen Anforderungen genügen. (Bpl. VHRIR. = hochauflösendes Infrarot-Radiometer.) Bei diesen Systemen, die meistens in Wettersatelliten Verwendung finden, sind aber gemäß ihrer Aufgabe, der täglichen Überdeckung der ganzen Erde, die Auflösungen in der Größenordnung um 1 000 m.

Scanner und Multispektralscanner gehen in ihrer Entwicklung zurück auf militärische Anforderungen der Nachtaufklärung im thermalen Bereich. Optisch-mechanische Abtaster führen in diesem Falle die thermale Strahlung gekühlten Detektoren zu, deren Spannungs- oder Widerstandsveränderungen Meßwerte in bildformenden Systemen liefern. Vidicons sind wegen der beschränkten Empfindlichkeit in den atmosphärischen Thermal-Infrarot-Fenstern (3–5 μm und 8–14 μm) nicht brauchbar. Insbesondere gelangen Indium-Antimonid- und Cadmium-Quecksilber-Tellurid-Detektoren zum Einsatz. Neben der thermalen Abbildung machte die Entwicklung von hochempfindlichen Photodioden es überdies möglich, im gleichen Strahlengang zusätzliche Meßelemente zu verwenden, die einerseits den elektromagnetischen Spektralbereich vom uv-nir abdeckten und andererseits darin streng selektierte hohe spektrale Auflösung ermöglichten.

Bei Multispektralscannern werden pro Zeiteinheit über das gleiche optisch-mechanische System Spektralmessungen in verschiedenen Bereichen des exakt gleichen Meßpunktes gemacht. Darum ist die Zuordnung der Einzelmessungen untereinander insbesondere bei Digitalscannern einfach.

Des weiteren eröffnen digitale Multispektralscanner die Möglichkeit, mit den Meßdaten digital geometrische und radiometrische Korrekturen durchzuführen und die Auswertung und Klassifizierung auf digitalem „repetierbarem“ Wege zu erreichen.

Inzwischen sind auch Multispektralscanner im „passiv“-Mikrowellenbereich im Einsatz, und Multifrequenz-Radar-Geräte sind in Entwicklung und Erprobung.

Radargeräten, insbesondere SAR (engl. „Synthetic Aperture Radar“), muß großes Potential für die Erkundung zugemessen werden. Die Auflösung ziviler Systeme ist z. B. bei SEASAT bei 25 m angelangt. Sie ist damit linear etwa doppelt so gut wie beim Multispektralscanner von Landsat-2, mit dem wichtigen Unterschied, ein Tag- und Nacht-Allwettersystem zu sein.

Die Schwierigkeiten bei diesen Daten liegen eindeutig bei ihrer Interpretation, da hier physikalische Materialkomponenten und Oberflächenfaktoren Einfluß haben. Entsprechende Boden-Vergleichsmessgeräte sind teuer und technisch komplex, so daß nur wenige Forschergruppen in der Lage sind, die grundlegenden Signaturprobleme zu studieren.

Bei *Mikrowellen-Radiometern und -Scannern* handelt es sich, im Unterschied zu den Radarsystemen, um passive Geräte. (Die Unterteilung in Radar = aktiv, Mikrowellengeräte = passiv entspricht dem Sprachgebrauch und ist daher nicht bindend.) Mikrowellengeräte müssen in der Lage sein, sehr geringe Energiemengen, Strahlungsleistungen etc. zu messen. Daher liegen die Probleme hier bei der relativ geringen Auflösung bei Satelliten-Einsätzen sowie auch der Interpretation der Daten.

Soweit es sich um Strahlungstemperaturmessungen von Wasserflächen und See-Eis handelt, sind die Auswertungen relativ einfach. Da bei Landflächen aber Geländekomponenten, Oberflächeneigenschaften, die Bodenfeuchtigkeit, die Eindringtiefe etc. großen Einfluß auf die Signatur haben, sind die Interpretationsprobleme komplexer Natur. Vielversprechend sind im regionalen Rahmen Bodenfeuchte-Untersuchungen im Zusammenhang mit agrarischen Überwachungsaufgaben.

Solid State Scanner mit SDA („Silicon Detector Arrays“) oder CCD („Charge Coupled Devices“) stellen die modernste Entwicklung auf dem Gebiet der Aufnahmetechnik dar. Hier besteht das strahlungsempfind-

liche Element aus einem linearen Array von Detektoren, der orthogonal zur Flugrichtung zeilenweise „abgefragt“, pro Einzeldetektor die Intensität eines Pixels (Bildelements) und pro linearem Array eine Zeile (Record) ergibt.

Durch die Bewegung in Flugrichtung und sequentielles „Abfragen“ der Zeileninformation lassen sich Bilder erzeugen.

Die Zeilenauflösung hängt somit von der Anzahl ansteuerbarer Einzeldetektorelemente ab. Heute (1978) sind Einzelchips mit 1 700 Detektoren pro inch im Handel. Für 1980 werden solche mit 3 000 Elementen pro inch erwartet. Mehrere Chips können in Serie verwendet werden. Die Bodenauflösung ist eine Funktion von der Anzahl und Empfindlichkeit der Detektorelemente, vom Faktor Fluggeschwindigkeit zur Höhe, der Auflösungsleistung der Optik sowie der „Abfrage“-Sequenz.

CCD können heute eingesetzt werden im Bereich $0,45\text{ }\mu\text{m}$ – $1,1\text{ }\mu\text{m}$. Arbeiten sind im Gange, die Empfindlichkeiten weiter in den nir- und ir-Bereich auszuweiten.

Durch Parallelschalten und Einsetzen geeigneter Filter lassen sich sehr einfach multispektrale Solid State Kamern, sog. multispektrale „push-broom“-Scanner, bauen. Ganz allgemein liegen die Vorteile gegenüber optisch-mechanischen Scannern darin, daß es keine „bewegten“ Teile (Scanner-Spiegel) und damit keine geometrisch-mechanischen Unstabilitäten gibt. Dadurch sind Ausgleichskorrekturen systeminterner Verzerrungen einfach und kontrollierbar.

Die Interrogationszeit des Einzelelementes ist sehr viel kürzer als bei konventionellen Scannern. Ist das Problem der Empfindlichkeit des Meßelements gelöst, so kann die Scanrate entsprechend erhöht werden.

Die größten Probleme liegen nicht mehr bei der geometrischen oder radiometrischen Auflösung, sondern in der Speicherung, Übermittlung und Verarbeitung der durch die neue Technologie möglich gewordenen enormen Datenmengen.

Sehr viel wird darum bei Satellitenanwendungen von Daten-Kompressionstechniken (bit-Reduktionen etc.) abhängen. Auch denkt man daran, hochauflösende „push-broom“-Scanner mit steuerbarer Bildachse für Zoom-Abbildungen von besonders wichtigen „Punktzielen“ (auch Testflächen etc.) zu verwenden. Eine An-Bord-Vorverarbeitung kann ebenfalls zur Datenreduktion beitragen.

Die Entwicklung der Sensortechnik hat im Moment die Entwicklung geeigneter Datenübermittlungstechniken sowie auch von geeigneten Verarbeitungssystemen überholt.

2.2 Die Landsat-Erderkundungssatelliten

Tab. 2 gibt einen Überblick über gegenwärtige und geplante Erderkundungssatelliten, darunter auch die Landsats. In dieser Arbeit wurde insbesondere mit den MSS-Daten von Landsat-1 gearbeitet. Das Gesagte hat aber auch Gültigkeit für die Anwendbarkeit von Daten der Satelliten Landsat-2 und -3, da Landsat-2 im Aufbau und der Ausrüstung identisch und die Verbesserungen bei Landsat-3 durch den Wegfall des 5. MSS-Kanals hinfällig geworden sind. Auf eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus des Satelliten sowie der Funktion seiner Sensoren, den Übertragungssystemen etc. wird verzichtet, da mannigfache Spezialliteratur dazu erhältlich ist (insbesondere Landsat Data Users Handbook)¹⁾.

Aus diesem Grunde hier nur das Wichtigste:

Die Landsats umkreisen die Erde auf einem quasi kreisförmigen, sonnensynchronen, polarnahen Orbit in 920 km Entfernung. Die Bahninklination beträgt ca. 99° und die Umlaufzeit 103 Minuten. Die im Aufbau an die Nimbus-Serie erinnernden Satelliten sind im wesentlichen mit drei für die Erderkundung wichtigen Systemen bestückt:

- Einem 3-Kanal-Return-Beam-Vidicon-System (RBV; bei Landsat-3 sind zwei identische 1-Kanal RBV mit gesteigerter Auflösung eingebaut) mit ca. 50 m Bodenauflösung, mit zwei Kanälen im sichtbaren und einem Kanal im Nah-Infrarot (Kanal Nr. 1–3).
- Einem 4-Kanal-Multispektral-Scanner-System (MSS; bei Landsat-3 ursprünglich fünf Kanäle) mit $0,2\text{ rad}$ totalem Gesichtsfeld (FOV) und ca. $0,086\text{ mrad}$ momentanem Gesichtsfeld (IFOV). Praktisch entspricht dies $79 \times 79\text{ m}$ Bodenauflösung; mit zwei Kanälen im sichtbaren und zwei Kanälen im Nah-Infrarot.

Kanal Nr. 4	500– 600 nm
Kanal Nr. 5	600– 700 nm
Kanal Nr. 6	700– 800 nm
Kanal Nr. 7	800–1 100 nm

Durch Überlappung der Einzelmessungen in Abtastrichtung entstehen rechteckige Bildelemente (Pixel) von ca. $57 \times 79\text{ m}$ Größe.

- Einem „Data Collection System“ (DCS) für den Relais von gesendeten Bodeninformationen aus dem Aufnahmegebiet zu den Landsat-Bodenempfangsstationen.

1) Landsat Data Users Handbook, NASA/GSFC, Greenbelt, MD.20771, USA, revised ed. 1978.

Land	Name	Dauer	Ausrüstung
USA	Landsat 1	1972–77	3-Kanal RBV (vis – nir) ca. 45 m Aufl. 4-Kanal MSS (vis – nir) 79 m Auflös. Data Collection System (DCS)
USA	Landsat 2	1975 . . .	gleich wie Landsat-1
USA	Landsat 3	1978 . . .	2 1-Kanal RBV (vis – nir) ca. 25 m Aufl. 5-Kanal MSS (vis – nir – ir), DCS
USA	HCMM	1978 . . .	2-Kanal abtast. Radiometer (vis – nir + ir), 500 m Auflösung
USA	Seasat 1	1978	2-Kanal abtast. Radiometer (vis – nir + ir) 4-Kanal Multifrequenz Mikrowellen Radiometer SAR mit 25 m Auflösung
USA	Landsat D	geplant 1982	gleich wie Landsat 3
USA	Landsat D-Prime	geplant 1983	4-5 Kanal MSS (vis – nir – ir) 7-Kanal Thematic Mapper (TM) 30 m Aufl.
USA	Landsat follow-on	geplant 1985	7-Kanal TM (vis – nir – ir) 10–120 m (ir) Auflösung Multispectral Linear Array (MLA)
F	SPOT A	geplant 1984	2 4-Kanal CCD „push broom scanner“ (vis – nir) ca. 10 m Auflösung
ESA	ERS 1 (COMSS)	geplant 1985	7-Kanal Ocean Color Monitor (MSS) (vis + ir) 180 m Auflösung SAR (C-Band) 30 resp. 100 m Auflösung Imaging Microwave Radiometer (IMR)
ESA	ERS 2 (LASS)	geplant 1988	6-Kanal CCD „push broom scanner“ (vis) 30 m Auflösung 5-Kanal MSS (vis – nir – ir) 60–120 m (ir) Auflösung SAR (C-Band) 30–100 m Auflösung

Abkürzungen

RBV	= Return Beam Vidicon
MSS	= Multispectral Scanner
HCMM	= Heat Capacity Mapping Mission
SAR	= Synthetic Aperture Radar
SPOT	= Système Probatoire d'Observation de la Terre
CCD	= Charge Coupled Device
ERS	= Earth Resources Satellite
COMSS	= Coastal Oceans Monitoring Satellite System
LASS	= Land Applications Satellite System

Tab. 2: Übersicht über amerikanische und europäische Erderkundungssatelliten und -projekte.

Weltweit sind heute folgende Empfangsstationen in Betrieb (Stand Juni 1978, aus: Landsat Newsletter Nr. 21)²⁾:

– USA	Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland
– USA	Goldstone, California
– USA	Fairbands, Alaska
– Canada	Prince Albert
– Canada	Shoe Cove
– Brasilien	Culaba
– Italien	Fucino
– Schweden	Kiruna
– Iran	Teheran

Geplant:	
– Indien	Hyderabad
– Argentinien	Mar Chiquita
– Australien	Alice Springs
– Japan	Tokyo

Ist der Satellit im Bereich einer solchen Empfangsstation, so können sämtliche Systeme in „real time“ aufgenommen und empfangen werden. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Empfangsdaten erst auf Magnetband gespeichert und

2) Landsat Newsletter, Mission Utilization Office, NASA/GSFC, Greenbelt, MD.20771, USA.

im Bereich der US-Empfangsstation GSFC abgespielt und übermittelt werden.

Das hier bearbeitete Bild gelangte noch über diesen zweiten Weg zu uns, während heute alle Landsat-Aufnahmen der Schweiz von Fucino bei Rom empfangen und bezogen werden.

Nachdem das Prinzip eines Multispektral-Bildabtasters in Abschnitt 2.1 bereits besprochen wurde, soll Abb. 2 das Aufbauschema des Landsat-MSS zeigen.

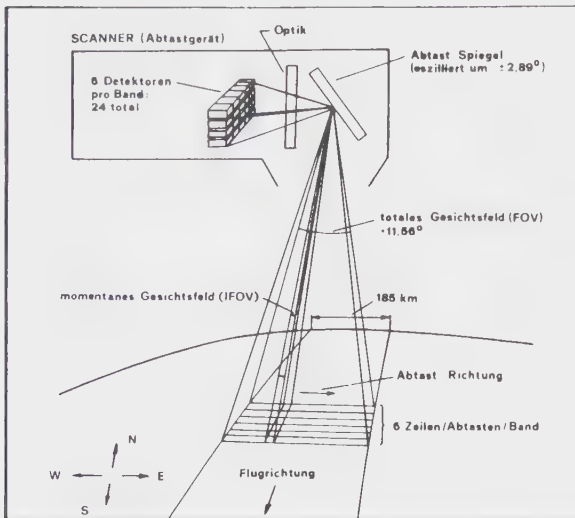


Abb. 2: Aufnahmesystem des Landsat-Multispektral-Scanners (für Landsat-1 und -2; Nach Landsat User's Handbook 1976, modifiziert).

Pro Spektralkanal sind simultan je sechs parallele Detektoren im Strahlengang angebracht. Mit anderen Worten werden pro Oszillation des Abtastspiegels gleichzeitig sechs Scanlinien aufgenommen. Individuelle Unterschiede in den Charakteristiken der Einzeldetektoren können darum zum im Abschnitt 5.4.5 erwähnten 6-Linien-Effekt zur Streifenbildung (engl. „banding“) führen.

Der Bildabtaster nimmt einen ca. 185 km breiten Streifen der Erdoberfläche auf. Dieser kontinuierliche Aufnahme fluß wird technisch dann in ca. 185 km lange Bilder aufgetrennt. Die Erde kann mit Ausnahme der Polarkappen lückenlos in 17 aufeinanderfolgenden Tagen überdeckt werden. Alle 18 Tage befindet sich der Satellit wieder über dem gleichen Aufnahmepunkt. Das komplexe Aufnahmesystem, die digitale Datenkompression für Speicherung und Übermittlung sowie die darauffolgende Dekompression der Daten sind neben den Detektoren, Verstärkern und elektrischen Störgrößen Anlaß zu mannigfachen radiometrischen Veränderungen der Meßdaten, auf deren Korrekturmöglichkeiten hier nicht eingegangen werden kann.

Wie daneben z. B. atmosphärisch bedingte radiometrische Korrekturen der Landsat-Spektraldaten vorgenommen werden können, zeigen u. a. Lyon (1975) und Stänz (1978).

Zu diesem Komplex gesellen sich nun vielfältige Probleme geometrischer Natur. Die folgende Darstellung (Abb. 3) gibt einen Einblick in einige zu bewältigende Aufgaben, will man in geometrisch-photogrammetrischem Sinne korrekte Aussagen machen.

Einige dieser Faktoren werden in der Vorverarbeitung der Magnetbänder bereits korrigiert, andere dagegen müssen selbst beseitigt werden (z. B. Skew bei EROS Data Center-Bändern).

Da in dieser Arbeit thematische Fragestellungen im Vordergrund standen, wurden die geometrischen Lösungen, weil gleichzeitig durch Lichtenegger (1978) behandelt, hier nicht speziell beschrieben. Den Endresultaten liegen aber auch noch gewisse geometrische Probleme inne, auf deren Korrektur bewußt verzichtet wurde.

Parameter	Geometr. Verzerrungen	Parameter	Geometr. Verzerrungen
Lageveränderung während Aufnahme - Orbithöhe (Massstabsanpassung)		Verschiebung der Spektralbänder	
Lageveränderung während Aufnahme - Querlage (roll)		Variation der Abtastspiegel-Geschwindigkeit	
Lageveränderung während Aufnahme - Längsneigung (pitch)		Panorama-Verzerrung	
Lageveränderung während Aufnahme - Kantung (yaw)		Lagefehler relativ zum Lage-sensor - Querlage (roll)	
Bildschiefe durch Erdrotation		Lagefehler relativ zum Lage-sensor - Längsneigung (pitch)	
Veränderung der Bahngeschwindigkeit		Lagefehler relativ zum Lage-sensor - Kantung (yaw)	
Bildschiefe durch Abtastvorgang			

Abb. 3: Übersicht über die geometrischen Verzerrungen, die bei Landsat-MSS-Bildern berücksichtigt werden müssen (nach Telespazio 1976).

2.3 Das Landsat-Multispektralscanner-Satellitenbild

Am Beispiel einer Aufnahme des Landsat Multispektralscanners soll verdeutlicht werden, welche Datenmengen zur Verarbeitung eines solchen Bildes anstehen.

Mit einem Landsat-Bild wird ein Gebiet von 185×185 km in vier Spektralkanälen erfasst. Die Bildelementgröße beträgt 57 m (wegen Überlapung) in Scan- und 79 m in Flugrichtung. Der Aufbau einer Aufnahme ist in Abb. 4 dargestellt.

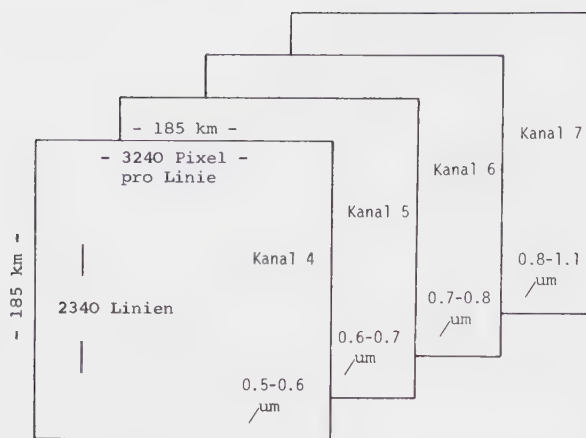


Abb. 4: Aufbau eines Landsat Multispektralscanner Satellitenbildes.

Pro Spektralkanal umfaßt das Bild über sieben Millionen Bildelemente (Pixel), total also bei vier Kanälen über 30 Millionen. Die Auflösung in den Meßkanälen beträgt 7-bit (Kanal 4, 5 und 6) und

6-bit (Kanal 7). Ein ganzes Bild füllt ein Magnetband zu neun Spuren bei 1 600 bit pro inch!

Damit soll gezeigt werden, um welche Größenordnungen von Datenmengen es sich im vorliegenden Falle handelt. Geht es, wie im Projekt „LACIE“ (Large Area Crop Inventory Experiment), um globale Ernteschätzungen, so sind die Datenmengen kaum mehr zu bewältigen. Eine Automatisierung der wichtigsten Prozesse ist unbedingt erforderlich. Da aber die atmosphärischen und lokalklimatischen Gegebenheiten das „absolute“ Anpassen verschiedener Bilder oder Aufnahmezeitpunkte erschweren, stehen vorderhand immer noch interaktive, halbautomatische Methoden der Klassifizierung im Vordergrund.

Der immer wieder auftauchende Wunsch nach besserer Auflösung ist auf der einen Seite verständlich, andererseits müssen aber erst Methoden entwickelt werden, um der enormen Datenmengen auch im Hinblick auf die Analyse Herr zu werden.

3 Grundlagen der Bildanalyse

Ausgangspunkt der Bildanalyse ist eine bildhafte Darstellung des zu untersuchenden Objektes in seiner Umgebung oder dessen Meßwerte auf einem geeigneten Datenträger. Dabei befaßt sich die Bildanalyse mit der Auswertung oder Interpretation des zu untersuchenden Kontextes. Wir unterscheiden die bildorientierte und die datenorientierte Bildanalyse.

Bei der bildorientierten Analyse werden die Abbildungen aufgrund ihres direkten Bildinhaltes, ihrer Meßwerte etc. verarbeitet, wohingegen bei der datenorientierten Verarbeitung meistens statistische oder numerisch-mathematische Prozesse und Entscheidungskriterien ausschlaggebend sind. Zusätzlich muß man generell zwischen analoger und digitaler Verarbeitung von Bildern bzw. Bilddaten unterscheiden. Die Definitionen der Begriffe analog und digital seien hier kurz erwähnt.

analog: die Daten liegen in meßbaren physikalischen Größen vor
digital: die Daten sind in zählbaren Einheiten vorhanden

Eine einfache Zuordnung der bildorientierten Verarbeitung zu analogen Methoden sowie datenorientierter Verarbeitung zu digitalen Methoden ist aber unzulässig, da es sowohl bildorientierte Digital- als auch datenorientierte Analoganalysen gibt. Auch werden bei Analyseprozessen oft bild- und datenorientierte Methoden vermischt und analoge sowie digitale Verfahren nacheinander benötigt (hybride Verarbeitung).

3.1 Analoge Verfahren der Bildanalyse

Laut Definition liegen die Daten in meßbaren physikalischen Größen vor, also beispielsweise als photographische Aufnahme oder analog gespeichert auf Magnetband. Eine analoge Analyse (s. Abb. 5) kann sich in zwei Schritten vollziehen, der Vorverarbeitung und der eigentlichen Verarbeitung.

In beiden Phasen können dieselben Techniken verwendet werden. Von Vorverarbeitung sprechen wir dann, wenn z. B. ein Bild verändert wird, um in einer anschließenden Phase dann besser ausgewertet werden zu können.

- Unter *manuellen Verfahren* kann man sich beispielsweise Markierungs- oder Maskierungstechniken, Bildmontagen in der Vorverarbeitung sowie Bildauswertungen oder -interpretationen in der eigentlichen Verarbeitung vorstellen.
- Unter den *photographischen Verfahren* finden wir neben einer Vielzahl von Methoden Kontrastveränderungen, Maskierungstechniken, Trennungungsverfahren, Äquidensitenmethoden, Farbveränderungen, Farbkombinationen, Bildratios, Bildadditionen und -subtraktionen etc.
- Mit Hilfe *elektro-optischer Verfahren* und z. B. Laseranwendungen können auf einfache Art Fourier-Transformationen und allgemeine Operationen in der „frequency domain“ durchgeführt werden.
- Als *elektronische Analog-Verfahren* werden z. B. Videotechniken bezeichnet. Darunter finden wir Dichtemessungen und -trennungen, Flächenmessungen, Objektzählungen, Größenmessungen, Kanten- und Kontrastverstärkungen etc.
- Mit *Analog-Computern* lassen sich viele Funktionen der elektronischen sowie der photographischen Verfahren ebenfalls durchführen. Daneben ist es aber außerdem möglich, mit ihnen mehrdimensionale Datensätze zu verarbeiten.

Große Vorteile ergeben sich z. B. im analogen Speichern von Bildern. Auf Analog-Disk läßt sich gegenüber Digitalplatten ein Vielfaches an Bilddaten speichern. Wenn die Rohdaten als analoge Werte vorliegen, ist darum eine

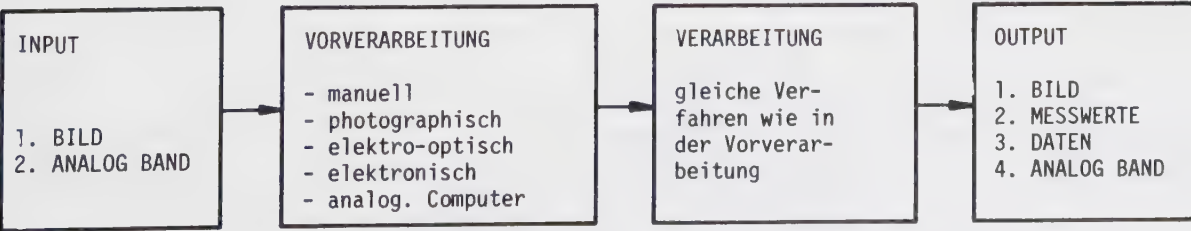


Abb. 5: Schematische Darstellung des analogen Bildanalyse-Prozesses.

Speicherung in der gleichen Art zu empfehlen, insbesondere aber auch dann, wenn viele solcher Datensätze kurzfristig abrufbar sein müssen.

Dies ist mit ein Grund zur Bildung von *hybriden Systemen*, bei denen Speicherfunktionen analog und die Verarbeitung nach A/D-Wandlung digital durchgeführt werden.

3.2 Digitale Bildverarbeitung

Die Verarbeitung von Daten erfolgt hier definitionsgemäß in der Form zählbarer Einheiten. Als Datenspeicher können sämtliche in der EDV gebräuchlichen Träger Verwendung finden.

Wir unterscheiden auch hier wieder zwischen der Vorverarbeitung und der eigentlichen Verarbeitung oder Klassifikation (s. Abb. 6).

Zwischen den beiden Verarbeitungsstufen ist die sogenannte „*Feature Selection*“ getreten, die eine Datenreduktion durch Auswahl zum Zwecke hat. Computer sind zwar „schnelle“ Datenverarbeiter, doch steigen auch hier die Kosten proportional mit der Datenmenge, ja sogar exponentiell mit der Anzahl der Kanäle. Darum ist es sinnvoll, vor der eigentlichen Klassifikation redundante Information zu eliminieren.

Die Vorverarbeitung kann zwei Zwecken dienen. Einerseits werden die Daten so verändert, daß die Schritte „*Feature Selection*“ und Klassifikation danach besser ablaufen können. Zu diesen Veränderungen können wir geometrische sowie radiometrische Korrekturen, das Korrigieren von Streifeneffekten, das Verwenden von mathematischen Filtern, Ratiobildungen, Bildadditionen und -subtraktionen, Koordinatentransformationen etc. zählen. Die zweite Möglichkeit betrifft Veränderungen, die zum Ziele haben, ein „ver-

deutlichtes“, verbessertes Bildprodukt herzustellen, das dann analog z. B. durch Bildinterpretationsmethoden verarbeitet werden kann.

Dieser Zweig der digitalen Bildvorverarbeitung ist nicht zu unterschätzen. Sehr häufig sind auch komplexe Probleme nach einer geeigneten Vorverarbeitung des Bilddatenmaterials auf einfachere und billigere Art analog lösbar.

Gegenüber analoger Vorverarbeitung ist die digitale viel flexibler und – was besonders im Hinblick auf Automatisierung gewisser Prozesse wichtig ist – die digital durchgeführten Schritte sind eindeutig definierbar und wiederholbar.

Mit der Forderung nach Wiederholbarkeit von Prozessen ist der Hauptvorteil aller digitalen Arbeit gegenüber der analogen klar ersichtlich.

Die eigentliche Verarbeitung oder Klassifikation geht von zwei Prämissen aus: Entweder wir haben einige Kenntnisse über das zu bearbeitende Gebiet oder wir wissen nichts darüber.

Fall 1:

Wir haben Teil-Kenntnisse — örtlich oder inhaltlich beschränkten sogenannten „ground truth“ — über die zu bestimmenden, zu klassifizierenden Objekte und/oder deren Hintergrund (Target zu Background Relation).

Diese Kenntnisse erlauben es, gewisse Randbedingungen festzulegen und zu programmieren.

Nur in den seltensten Fällen hat man gar keine Kenntnisse. Oft werden sogenannte „scientific guesses“ (wissenschaftlich begründete Vermutungen) benutzt, um fehlenden „ground truth“ zu ersetzen. Da man aber oft nach statistischen Gesetzen arbeitet, sollte man sich der statistischen Feh-

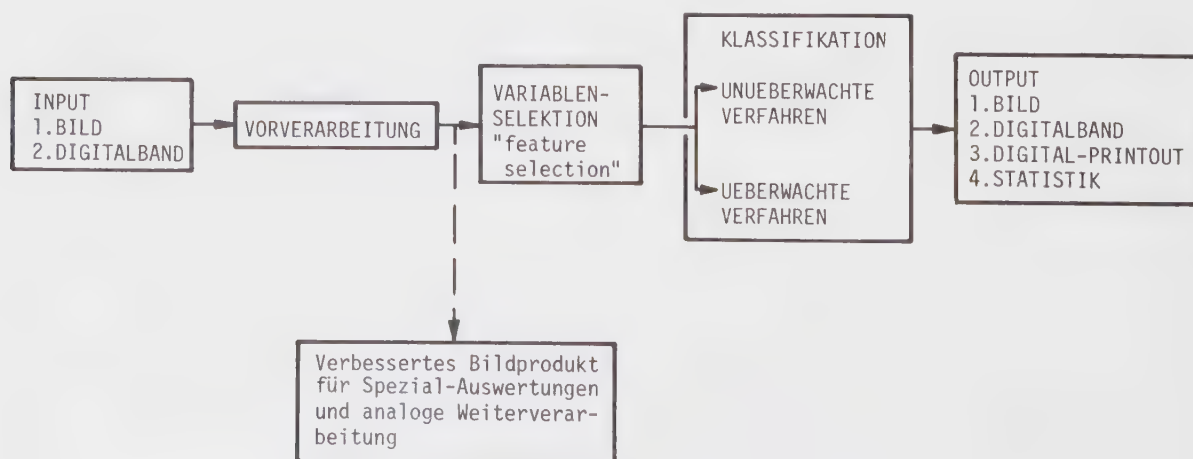


Abb. 6: Schematische Darstellung des digitalen Bildverarbeitungs-Prozesses.

ermöglichkeiten bei solchen Schätzungen bewußt sein. Mit anderen Worten hängt die Güte des Endresultats direkt von der Güte des „ground truth“, der Qualität der Vorkenntnisse ab.

Man bezeichnet diesen, in kontrollierbaren Grenzen verlaufenden, Prozeß als „*supervised classification*“, als überwachte Verarbeitung.

Bei der eigentlichen Klassierung geht es um die Kategorien- oder Gruppenzuordnung von Bildelementen gemäß ihrer Meßwerte im n-dimensionalen Variablen- oder Eigenschaftsraum.

Betrachten wir im Falle einer multispektralen Analyse in Abb. 7 die spektralen Reflexionen zweier Oberflächentypen (Typ 1 und Typ 2) und messen in vier Wellenlängen λ_1 bis λ_4 .

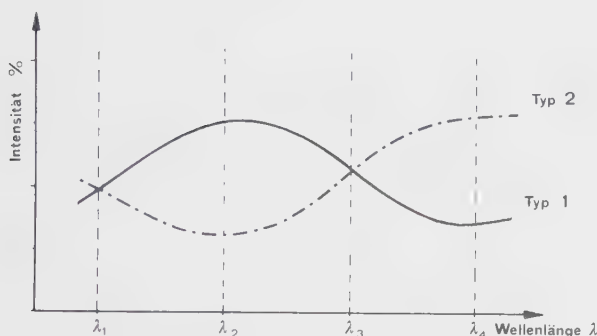


Abb. 7: Spektrale Reflexion zweier Oberflächentypen.

In λ_1 und λ_3 ist es nicht möglich, die Oberflächentypen zu trennen. Diese „Meßkanäle“ fallen für dieses Unterscheidungsproblem aus (Feature Selection).

Sehen wir uns die beiden Meßproben in der Variablen- oder Eigenschaftsebene λ_2 / λ_4 (Abb. 8) an, so erkennen wir übersichtlich die gute Trennbarkeit.

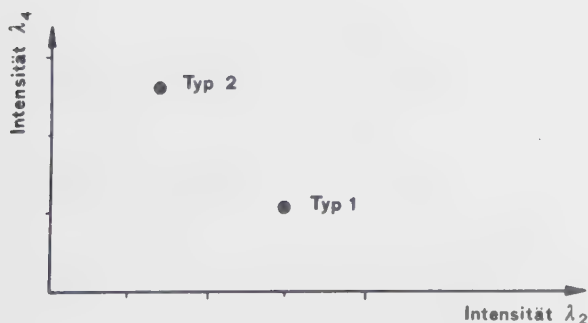


Abb. 8: Meßpunktlagen in der Eigenschafts- oder Variablenebene λ_2 / λ_4 .

Verwendet man nun seine Teil-Kenntnisse, wenn man z. B. örtlich begrenzt weiß, daß eine Fläche (zusammengesetzt aus mehreren Bildelementen) dem Typ 1 (z. B. Grünland) entspricht, und daß ein benachbartes Gebiet dem Typ 2 (z. B. Wald) zugehört, so werden diese Meßwerte trotz einer gewissen statistischen Streuung in der Variablenebene zugeordnet werden können (s. Abb. 9). Man kann die bekannten Stichproben in Lerngruppen zusammenfassen (Lerngruppe Grünland, Lerngruppe Wald etc.).

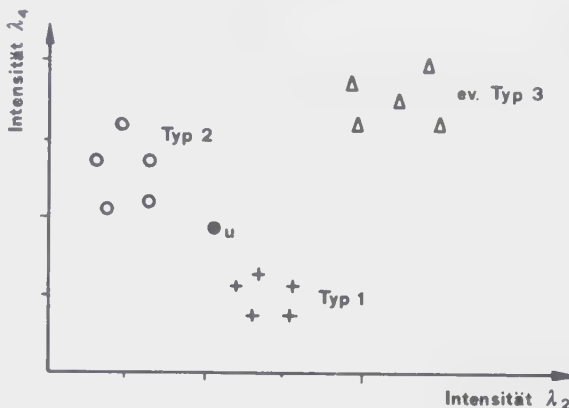


Abb. 9: Lage der Lerngruppen in der Variablenebene λ_2 / λ_4 .

Wird nun ein beliebiges unbekanntes Bildelement (in Abb. 9 = u) in der Variablenebene dargestellt, so ergibt sich das Problem einer allfälligen Zuordnung zu Typ 1 oder Typ 2. Es besteht außerdem die Möglichkeit, daß „u“ einem bisher nicht bekannten Typ 3 zugehört.

Mit Hilfe verschiedener mathematisch-statistischer Klassifikations-Algorithmen läßt sich nun die Zugehörigkeit zu einer Gruppe oder Klasse prüfen.

In Abb. 10 sind einige dieser Methoden für den zweidimensionalen Fall veranschaulicht. Das bisher Gesagte gilt sinngemäß für „beliebig“ viele Dimensionen.

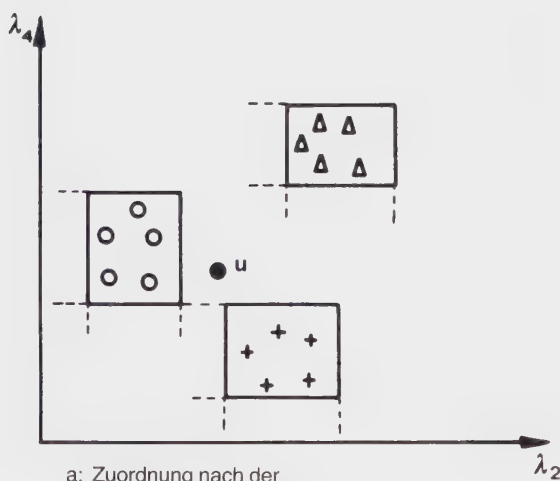
- Die *Parallel-Epipede-Methode* (Abb. 10a) erlaubt, durch gruppenweise Angaben von Unter- und Obergrenzen der Meßwerte in jedem Kanal, eine sehr einfache und computertechnisch schnelle Zuordnung von Bildelementen. Durch interaktives Verschieben der Grenzwerte und die Kontrolle der dabei veränderten Resultate ist es möglich, in vielen Fällen schnell zu einem brauchbaren Resultat zu kommen. Bei speziellen Verteilungen der Lerngruppen, z. B. über größere Bereiche in einer oder mehreren Meßdimensionen, müssen solche Blöcke oder Parallel-Epipede aufgeteilt oder aus mehreren kleineren zusammengesetzt werden.

- Bei der *Zentroidmethode* (Abb. 10b) wird das Kriterium der kürzesten Distanz zum nächsten Lerngruppen-Mittelpunkt verwendet. Für eine definitive Zuteilung oder Abweisung bei „weit entfernten“ Meßpunkten können Grenzwerte typenspezifisch angewandt werden.
- Die *minimale Distanz zum nächsten Nachbarn* (Abb. 10c), bezogen auf den nächsten Lernstichproben-Nachbarn, kann ebenfalls als Klassifikations-Algorithmus Verwendung finden.
- Die Methode der „*maximalen Mutmaßlichkeit*“ (maximum likelihood, Abb. 10d) basiert auf statistischen Grundsätzen. Aus den Lernstichproben und -gruppen lassen sich statistische Wahrscheinlichkeitsdichten für die Zuordnung neuer Elemente berechnen. Voraussetzung dafür ist die Annahme, die Objektmeßwerte eines Types seien in jedem Kanal

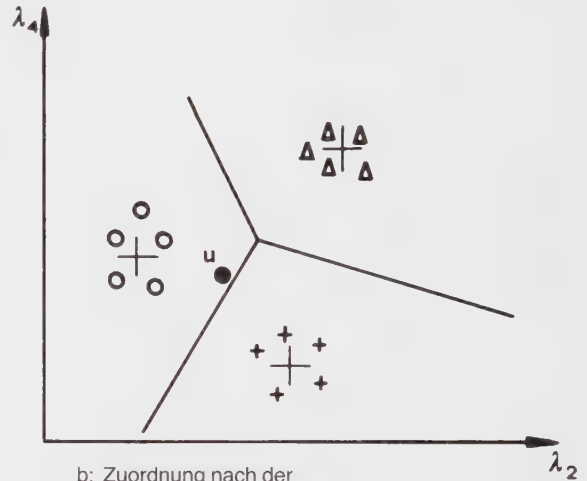
statistisch „normal“ verteilt (Gauss'sche Verteilung). Treten bei der statistischen Bearbeitung extreme Abweichungen von Normalverteilungen auf, so kann man versuchen, durch Aufspalten in Untergruppen oder durch Koordinatentransformationen quasi-normale Verteilungen zu erzeugen.

Auch hier besteht die Forderung nach typenspezifischen Grenzwerten, im erwähnten Fall als Inkrement von n -Standard-Abweichungen zum Lerngruppen-Mittelwert.

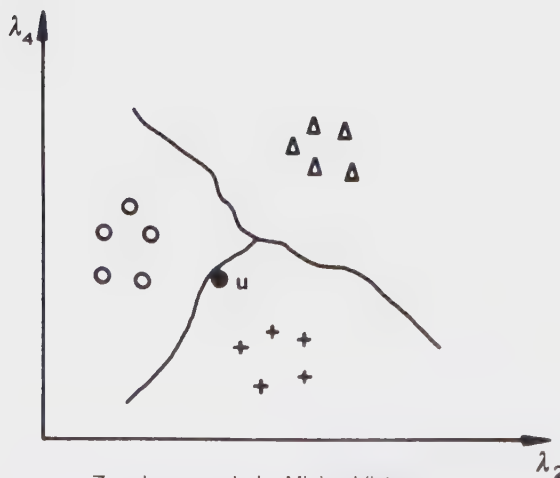
Dieser Klassifikations-Algorithmus ist besonders bei schwer trennbaren Gruppen bzw. Klassen, mit sich in allen Meßvariablen (Kanälen) überschneidenden Bereichen, von großem Nutzen. Andererseits ist das Verfahren sehr rechenintensiv und damit teuer. Darum ist eine Variablenreduktion sehr wichtig. Ein weiterer Grund für eine sorgfältige Selektion



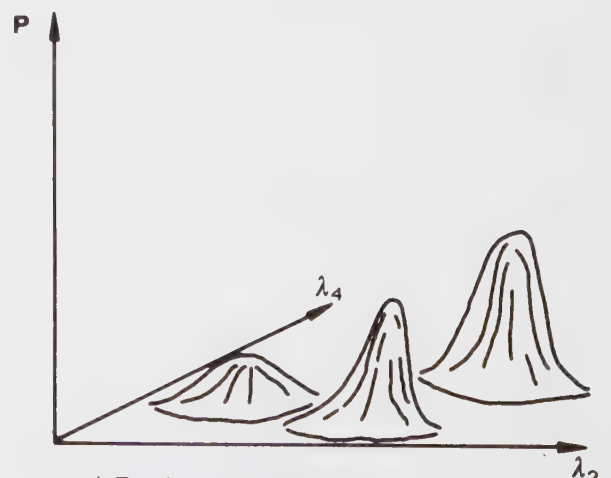
a: Zuordnung nach der Parallelepiped-Methode



b: Zuordnung nach der Zentroid-Methode



c: Zuordnung nach der Minimaldistanz zum nächsten Nachbarn



d: Zuordnung nach der maximalen Mutmaßlichkeit

Abb. 10: Beispiele von Zuordnungskriterien zur Klassifikation multispektraler Datensätze.

der Variablen ist die Tatsache, daß von einer gewissen Anzahl Kanäle an aus statistischen Gründen Nicht-Klassierungen und Fehl-Klassierungen häufiger werden.

Ganz allgemein lohnt sich in komplexen Fällen oft eine Hauptkomponenten-Analyse zur Reduktion redundanter Information und zur Optimierung der Trennmöglichkeiten im neuen Variablenraum. Die Verwendung von synthetischen Ratiovariablen kann eine einfache Dimensionsreduktion herbeiführen. Die schrittweise Diskriminanz-Analyse erlaubt eine Selektion der geeignetsten Variablen.

Fall 2:

Wir besitzen keine Kenntnis über den tatsächlichen Bildinhalt. Damit überläßt man es ganz statistischen oder hierarchischen Gruppierungsmethoden, der sogenannten *Cluster-Analyse*.

Man kann beispielsweise so vorgehen, daß man das erste Bildelement einer Gruppe 1 zuordnet und bei einem zweiten Element prüft, ob es innerhalb gewisser fixer Grenzen liegt. Wenn ja, so wird es ebenfalls zur Gruppe 1 geschlagen, wenn nein, so bildet es das Zentrum einer neuen Gruppe 2. Dann folgen sinngemäß die weiteren Bildelemente.

Ein anderes Verfahren betrachtet die Gesamtheit oder eine statistisch repräsentative Auswahl von Bildelementen im mehrdimensionalen Variablen-

raum, und es wird versucht, auf mathematischem Wege Gruppenzentren zu finden, von denen aus dann z. B. nach der Zentroid- oder der Methode der maximalen Mußmaßlichkeit klassiert wird.

Da man a priori nicht weiß, wie viele Oberflächentypen vorhanden sind, muß man diese Rechnungen iterativ, schrittweise für eine variable Anzahl von Gruppen (Clusters) durchführen. Ein Maß für die Güte der Gruppierung sind die Mittel der Abstandsquadrate der klassierten Elemente zu den jeweiligen Zentren. In Abb. 11 wird als Beispiel die Aufteilung einer Datenpopulation auf drei Clustergruppen gezeigt.

Die erste Cluster-Methode ist wenig rechenintensiv, schnell und daher geeignet, bei minimalen Vorkenntnissen interaktiv angewandt zu werden. Die Resultate bleiben aber schwer interpretierbar.

Die zweite Methode ist extrem rechenintensiv, zeigt aber bei kleiner Gruppenzahl und kleiner Datenmenge sehr gute Resultate.

In verschiedenen digitalen Klassifikationssystemen werden in den „überwachten Verfahren“ die Lernstichproben mit Hilfe der Cluster-Analyse auf ihre Homogenität überprüft und, wenn nötig, Lern-Untergruppen gebildet. In Abb. 12 wird das Ablaufschema im LARSYS-System der Purdue Universität als Beispiel einer Kombination der beiden Fälle gezeigt.

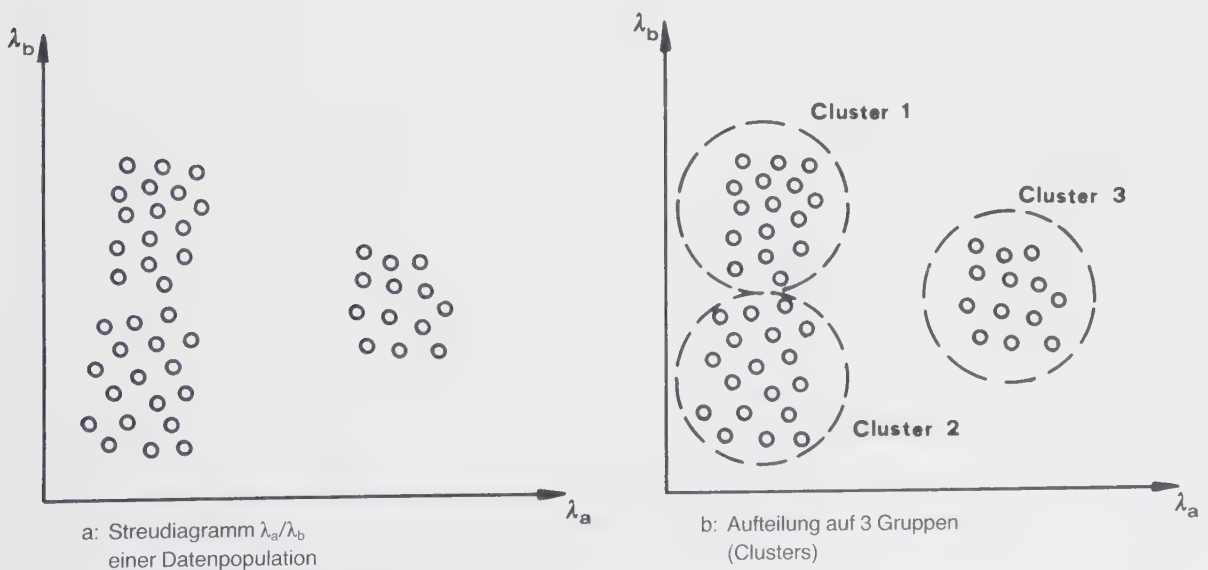


Abb. 11: Beispiel einer Gruppierung in drei Cluster.

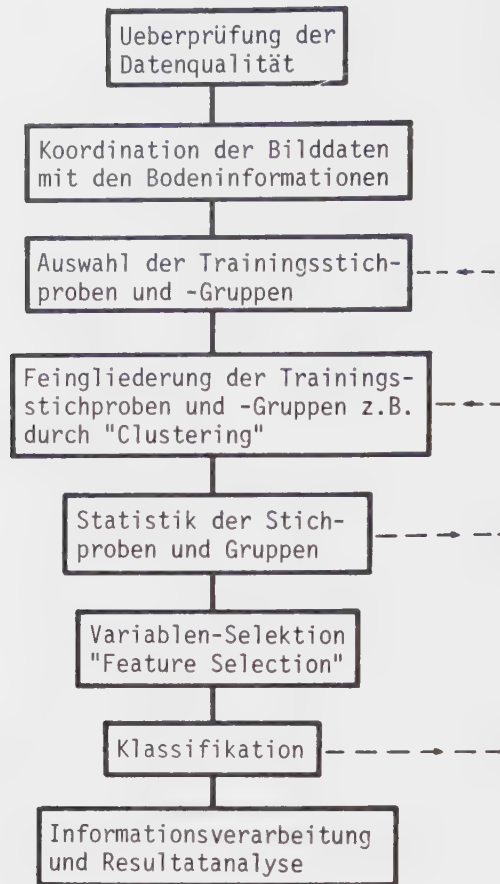


Abb. 12: Ablauf einer digitalen Bildverarbeitung nach dem LARSYS-Prinzip (Purdue University, West Lafayette, Ind.).

Folgerungen

Abschließend kann zu diesem Kapitel Bildverarbeitung gesagt werden, daß es sich auch für den Anwender oder Benützer lohnt, alle möglichen Verfahren in Betracht zu ziehen, um dann in Kenntnis der Vor- und Nachteile, seinen Anforderungen und Möglichkeiten angepaßt, den für ihn besten Weg der Bildanalyse zu beschreiten. Eine Universallösung oder ein Universal-System gibt es nicht.

Zusätzlich hängt das Resultat – gleich mit welcher Methode erreicht – von der Qualität und eventu-

ell Quantität der Kenntnisse des Bildinhaltes oder des Problems ab. Weiß man alles, so ist eine Bildanalyse überflüssig. Weiß man nichts, so wird auch eine komplexe Bildverarbeitung Resultate fraglicher Brauchbarkeit liefern.

Das Studium des Problems, zuerst theoretisch, dann als Laboranalyse, als Feldversuch, als in situ („ground truth“) während der Anwendung der Methoden der Fernerkundung und anschließende optimale Analyse des Materials kann aber in vielen Fällen, in ökonomisch vertretbarem Rahmen, zu brauchbaren Resultaten und Lösungen führen.

4 Beurteilung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten von Landsat-Klassifizierungen in der Schweiz

Aus dem weit gefächerten Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten der Satelliten-Fernerkundung für die Erdwissenschaften seien einige herausgegriffen, die nach dem heutigen Stand der Forschung in unseren schweizerischen Verhältnissen erfolversprechend für landesweite Inventuren eingesetzt werden können.

4.1 Anwendungsmöglichkeiten in der Hydrologie

4.1.1 Oberflächengewässer

Hier stellt die landesweite Kartierung von Seen mit Satellitendaten keine großen Probleme, während Flüsse nur dann erfaßt werden können, wenn sie genügend breit sind (s. Abschnitt 5.4.1).

Sehr erfolgreiche Anwendungen sind aus den Vereinigten Staaten bekannt, wo z. B. regelmäßig die periodischen Überschwemmungen des Mississippi mit Hilfe von Landsat-Bildern erfaßt werden (Rango & Anderson 1974).

Bei uns sind die kartographischen Grundlagen an sich sehr genau. Daher besteht kein grundsätzlicher Bedarf der Neukartierung von Wasserflächen mit Satellitendaten. Es könnte sich allerdings auch in der Schweiz bei Naturkatastrophen allenfalls als notwendig erweisen, z. B. Überschwemmungskartierungen vorzunehmen. Dann könnten solche Methoden sehr wohl ein grobes Bild darüber vermitteln.

Im „Sri Lanka Satellite Image“-Projekt (Geiser *et al.* 1978) hat sich das Bedürfnis der regelmäßigen Überwachung von Bewässerungsreservoirs und entsprechender Wasserpotentialrechnungen gezeigt. Dieses Problem auf schweizerische Stauseen bezogen, stellt sich nicht, da entsprechende Bodenmeßsysteme vorhanden sind und Verbindungen keine Probleme darstellen.

4.1.2 Wasserqualität

Untersuchungen von Soerensen (1975) am Langensee haben u. a. gezeigt, daß wegen des Fehlens von Meßkanälen im Blaugrün-Bereich die Eindringtiefe in Wasser sehr beschränkt ist. Mit Kanal 4 können allenfalls Aussagen über die Sedi-

mentfracht und die Verbreitung oberflächlich sichtbarer Verschmutzungen gemacht werden.

Mit dem in Nimbus-7 zur Anwendung gelangenden 7-Kanal Coastal Zone Color Scanner sind erstmals Voraussetzungen geschaffen worden, thematisch solche Fragestellungen zu untersuchen. Die Auflösung von 500 m läßt allerdings für unsere Inlandgewässer keine Anwendungen zu.

4.1.3 Bodenfeuchtigkeit

Immer wieder wird man angesprochen auf die Frage nach der Brauchbarkeit von Landsat-MSS-Aufnahmen zur Bodenfeuchte-Bestimmung. Hier kann dem heutigen Stand der Technik entsprechend gesagt werden, daß diese generelle Anwendbarkeit für unseren Raum und unseren Klima-/Vegetations-Bereich nicht gegeben ist. Einige der erschwerenden Faktoren seien hier erwähnt:

- Die Spektralbänder sind dafür nicht geeignet.
- Die Vegetationsdecke ist zu dicht; sie kann höchstens als sekundärer Indikator verwendet werden; dann aber ist das räumliche Auflösungsvermögen kritisch.
- Die Bodenphysik und Bodenchemie sind nicht direkt erfaßbar.
- Atmosphärische Korrekturen sind unbedingt erforderlich.

Zukünftige Lösungsmöglichkeiten deuten auf die Anwendung der passiv-Mikrowellen-Radiometrie hin. Damit fällt der Faktor „Beeinflussung durch die Vegetation“ weitgehend dahin. Hingegen können trotz relativ schlechter Auflösung (ca. 10^4 – 10^5 m) diese Meßdaten z. B. bei Ernteprognoseproblemen durch großräumige Erfassung der Bodenfeuchte dienlich sein.

Interessante Ergebnisse sind von aktiven SAR-(Synthetic Aperture Radar)-Systemen zu erwarten. Im für marine Applikationen gebauten Seasat-1 fand ein SAR-System mit ca. 25 m Bodenauflösung Verwendung. Solche, bei Tag und Nacht und jedem Wetter einsetzbare Systeme geben für Katastrophenüberwachung und allgemeine hydrologische Applikationen zu großen Hoffnungen Anlaß.

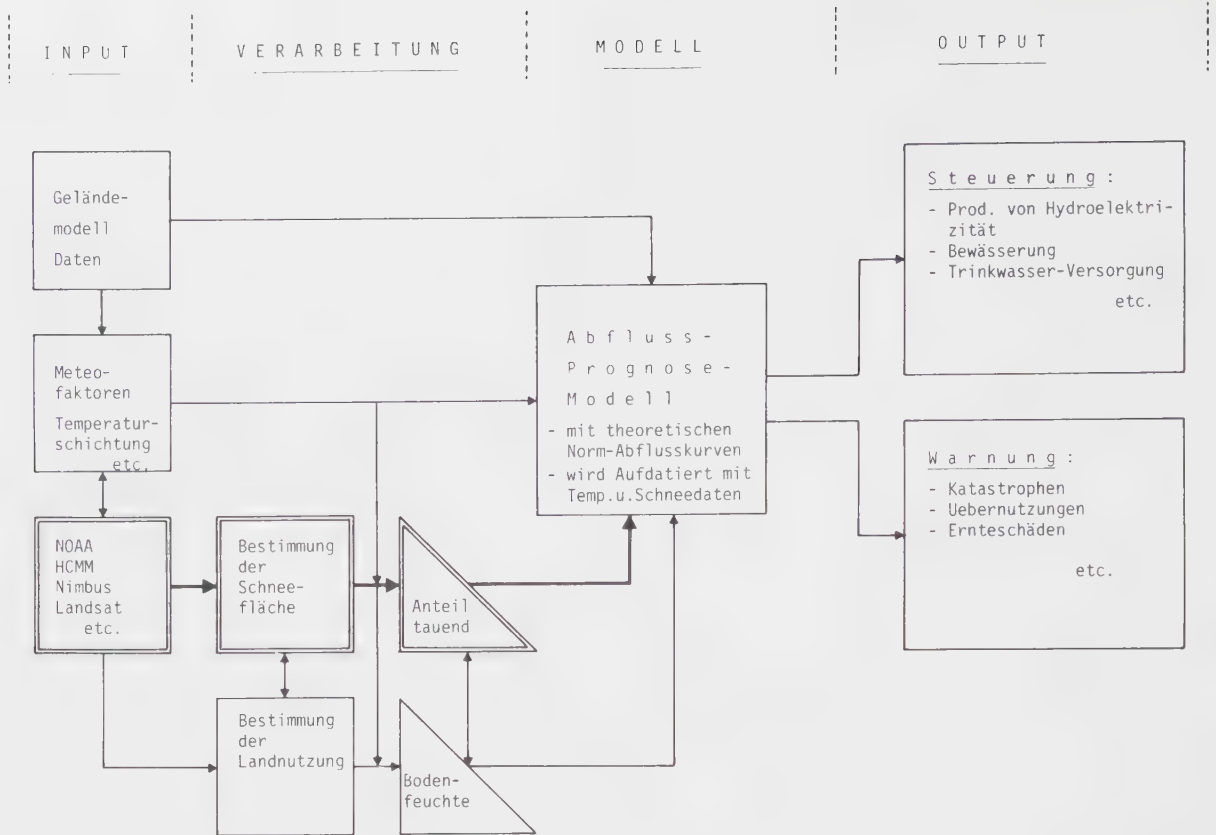


Abb. 13: Schematische Darstellung der Verwendung von Satellitendaten in Kombination mit anderen Quellen in einem Abfluß-Prognose-Modell.

4.1.4 Schnee und Eis

Die Kartierung und Überwachung der Schneegrenze und der verschneiten Fläche stellt gegenwärtig wohl für unser Land eine der wichtigsten und besten Anwendungen dar.

Unter Zuhilfenahme von hypsographischen und meteorologischen Korrekturparametern und modelltheoretischen Berechnungen könnten mittelfristige Wasserabflußprognosen erstellt werden (Abb. 13).

Die Ermittlung der Schneefläche in ihrer Ausdehnung und Höhenverteilung ergibt mit dem höhenabhängigen Temperaturparameter ein sogenanntes Abflußpotential, das, über die Zeit integriert, zu Abflußmengenschätzungen führen kann (Itten 1979).

Je mehr Aufnahmen während einer Abschmelzperiode (in der Schweiz von März bis Juni), desto besser kann das theoretische, sich primär auf „Grad-Tage“ stützende Modell aufdatiert werden (Abb. 14).

Die Modelluntersuchungen und Tests haben in einem sehr gut überwachten Einzugsgebiet von

ca. 43,7 km², dem Dischmatal (bei Davos) stattgefunden. Gegenwärtig sind Verifikationstests mit dem von Martinec (1975, 1976, 1979) am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weißfluhjoch-Davos, entwickelten Modell in den Vereinigten Staaten im Gange. Versuche in größerem Rahmen sind in der Schweiz für 1979 geplant. Noch sind hier vor allem die Probleme des „Aufnahmewetters“ von einschneidender Bedeutung. Es ist darum auch in diesem Sektor interessant, die Entwicklungen auf dem Gebiete der Anwendung von SAR-Methoden zu verfolgen.

Wenn solche Aufnahmesysteme operationell eingesetzt werden können, so ist mit deren Hilfe bei uns mit der operationellen Anwendungsmöglichkeit im Sektor Abflußprognosen z. B. zur Steuerung der hydroelektrischen Stromerzeugung zu rechnen.

Unter der Voraussetzung von genügend brauchbaren Satellitenbildern (USA-Tests) kann bereits heute die totale saisonale Abflußmenge durch die Korrekturen mit Hilfe von Landsat-Resultaten auf $\pm 2\%$ genau ermittelt werden. Kurzfristige Prognosen weisen dagegen naturgemäß höhere Unsicherheitsgrade auf.

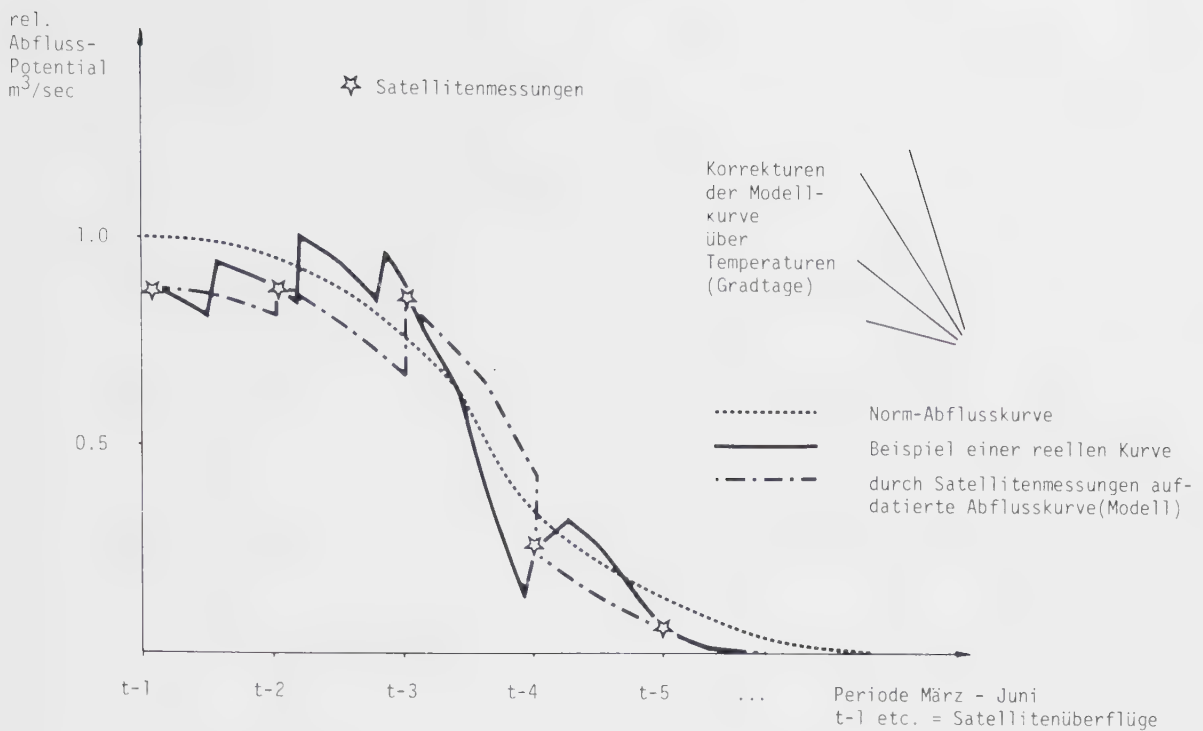


Abb. 14: Vereinfachte Darstellung der Korrektur von Abfluß-Modellrechnungen durch Aufdatieren mit Hilfe von Satellitenmessungen zu den Überflugszeitpunkten t-1 ... t-5.

4.2 Anwendungsmöglichkeiten in der Land- und Forstwirtschaft

Entgegen den Resultaten, die in den USA bei landwirtschaftlichen Untersuchungen erzielt wurden, sind bei uns die Verhältnisse grundlegend anders.

In der schweizerischen Landwirtschaft herrschen kleine Feld- und Parzellenflächen vor, die für die Landsat-MSS mit ihrem beschränkten Auflösungsvermögen kaum Möglichkeiten der räumlichen Erfassung bieten. Eine Erkennung gar der Kulturen steht damit vorläufig außer Frage. Die Bearbeitung dieses Problemkomplexes wird in der Dissertation von *Lichtenegger* an einem Gebiet mit ausreichend großen Feldern (Großes Moos) mit multitemporalen Landsat-Daten durchgeführt.

Die Frage, was bei unseren Gegebenheiten an großräumigen Inventuren möglich sei, kann heute vorsichtig dahingehend beantwortet werden: Relativ eindeutig lassen sich vegetationsbedeckte Wiesen und Felder von größeren zusammenliegenden vegetationslosen Flächen, z. B. gepflügten Äckern, Sand- und Kiesflächen sowie Baugruben, unterscheiden. Damit können beispielsweise in in-

tensiven Ackerbauzonen der Grad der Vegetationsbedeckung ermittelt und somit Rückschlüsse auf den Stand im Anbauzyklus gemacht werden.

Mit den geplanten Erderkundungssatelliten der nächsten Generation (Landsat-D mit 7-Kanal „Thematic Mapper“ mit ca. 30 m Auflösung) wird es auch unter schweizerischen Agrarverhältnissen möglich sein, gewisse Landnutzungstypen direkt zu klassieren und gewisse statistische Methoden zu testen.

In Abb. 15 wird eine Klassifikation größerer vegetationsloser Flächen in der Reuss-Ebene im Raume Jonen-Merenschwand dem entsprechenden Landeskartenausschnitt gegenübergestellt. Zum Aufnahmezeitpunkt, Oktober 1972, sind schon viele Felder gepflügt.

Unter den gegebenen Aufnahmeverhältnissen (Landsat-1 bis -3) ist es angebracht, keine weiteren großräumigen landwirtschaftlichen Inventarisierungen demonstrieren zu wollen. Allerdings ist es nicht ausgeschlossen, daß in bestimmten Regionen gewisse Landnutzungskategorien auch schon heute ausgeschieden werden können; so

beispielsweise im St. Galler Rheintal, in der Magadinoebene und im Großen Moos.

Im forstwirtschaftlichen Anwendungsbereich sind großräumige Klassierungen in Nadel- und Laubwald mit Landsat-MSS-Daten relativ einfach lösbar. Durch die jahreszeitlichen Unterschiede mit herbstlicher Verfärbung und dem winterlichen Laubfall sind genügend Parameter gegeben, solche Inventarisierungen zuzulassen.

Gegeben durch das Auflösungsvermögen des Satelliten und durch die heute meist anzutreffende Anbautechnik des Mischwaldes, kann strenggenommen nur in die Kategorien „vorwiegend Nadelwald“ und „vorwiegend Laubwald“ unterschieden werden. Insgesamt aber bietet der Wald wenig Probleme. Diese sind, wie in Abschnitt 5.4.3 beschrieben, vor allem definitorischer Natur

oder folgen aus komplexen Mischungsverhältnissen.

Wenn es die räumlichen Gegebenheiten erlauben, so kann man sich neben der reinen Inventarisierung auch bei uns Anwendungen im forstlichen Bereich zu folgenden Themen denken:

- Verfolgung des Laub-/Nadelfalles und damit verbunden das Erkennen gewisser Schädlings- oder Streß-Situationen.
- Grobkartierungen von größeren Waldbrandschäden.

Ein praktisches Beispiel einer Landsat-Klassifikation der Klassen „Nadelwald“, „Laubwald“ und „Wasser“ im Vergleich mit einer Waldkarte im Maßstab 1:200 000 zeigt Abb. 16.

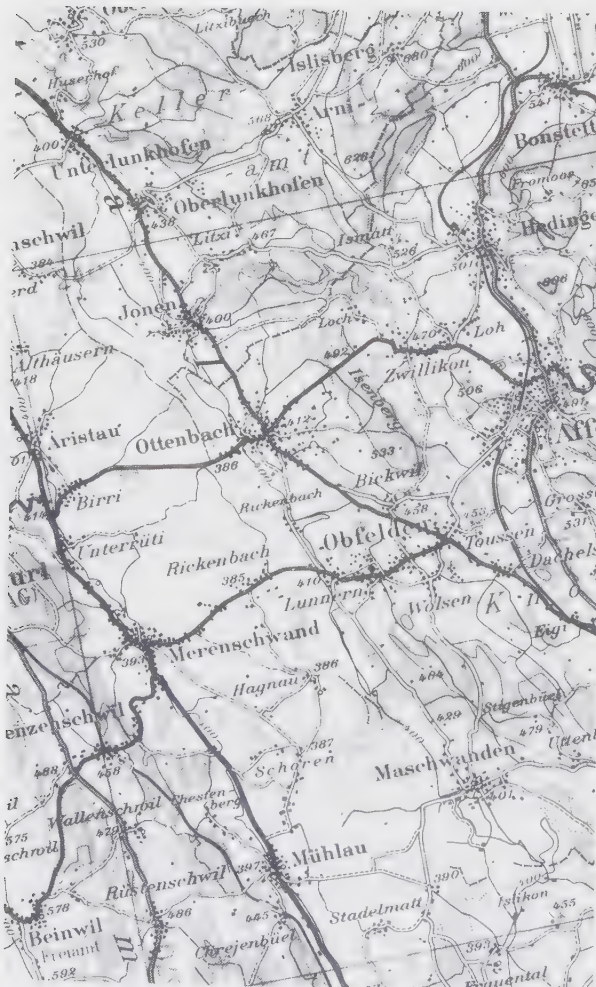


Abb. 15: Landsat-Klassifikation größerer vegetationsloser Flächen in der Reussebene im Raum Jona-Merenschwand im Vergleich mit der Landeskarte 1:100 000.

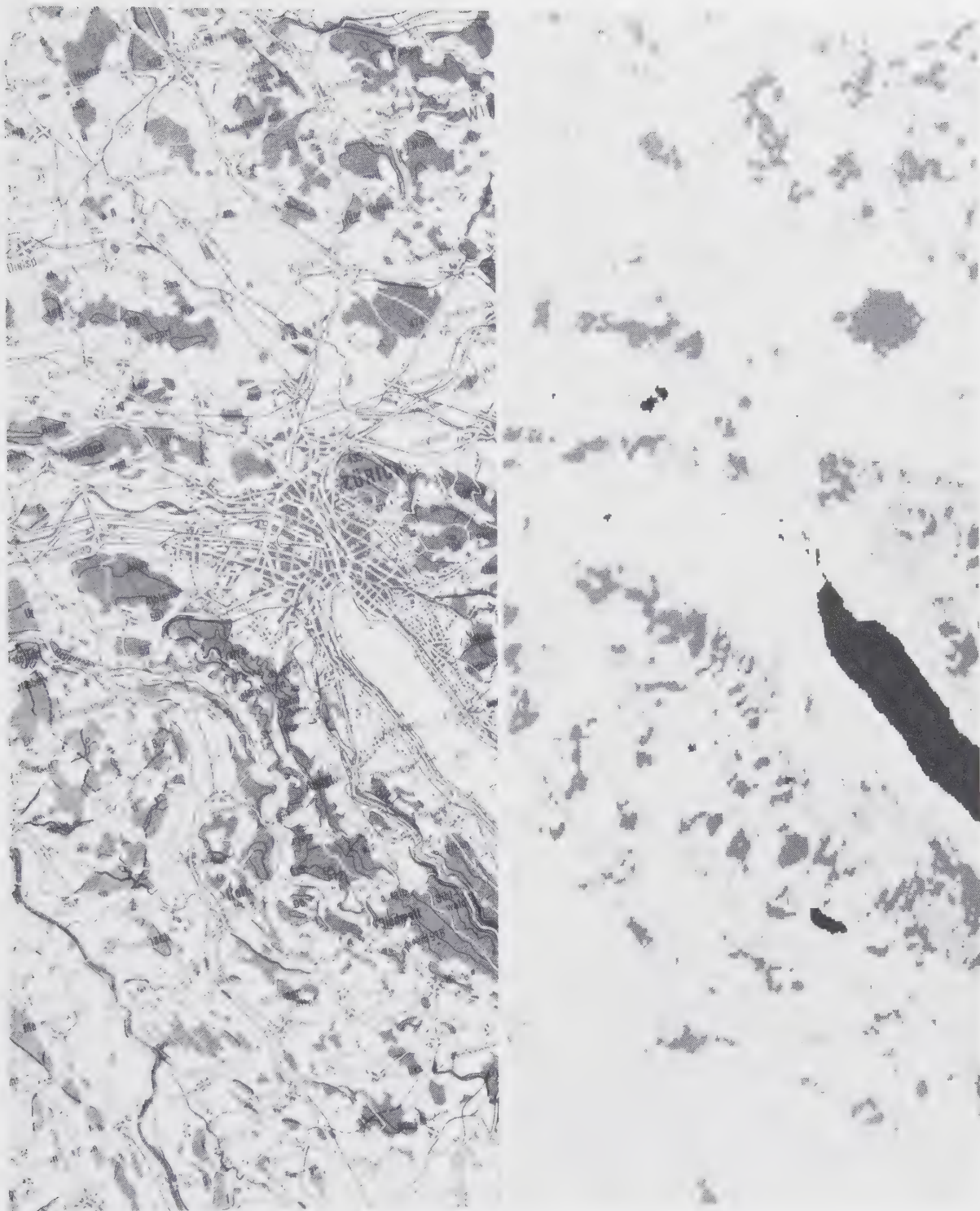


Abb. 16: Landsat-Klassifikation (rechts) der Klassen „Nadelwald“ (dunkelgrau), „Laubwald“ (hellgrau) und „Wasser“ (schwarz) im Vergleich mit einer „Waldkarte“ (Vorabdruck, Wald = dunkle Flächen) der Eidg. Landestopographie im Maßstab 1:200 000.

4.3 Anwendungsmöglichkeiten für die Überbauungsforschung

4.3.1 Vergleich einer Landsat-Klassifikation mit der Karte

Kartographische Darstellungen über die Bebauung größerer Regionen fehlen fast vollkommen. Hinzu kommt die Tatsache, daß auch eine sehr präzise Landeskarte (z. B. 1:25 000 oder 1:50 000) im Minimum 2½ Jahre alt ist, bis sie dem Benützer (z. B. Architekten, Planern etc.) zur Verfügung steht. Hinzu kommt der Landeskarten-Erneuerungszyklus von sechs Jahren, so daß im ungünstigsten Falle eine Karte verwendet werden muß, die den Stand vor acht Jahren zeigt. Die Aktualität gerade im Bereich der Bebauung oder der sich so rasch ändernden, zunehmenden Besiedlung randstädtischer Zonen ist demnach bei der konventionellen Landeskarte in Frage gestellt.

Hier kann das aktuelle Satellitenbild Ergänzungsinformationen liefern, die zur Aktualisierung der betreffenden Unterlagen und Karten beitragen können.

Des weiteren lassen sich grobe Aussagen machen über die Dichte der Bebauung. In unserem Beispiel, einem Ausschnitt der Besiedlung des nördli-

chen schweizerischen Mittellandes, sind die zwei Stufen „dicht besiedelte Innenstadt und Industrie“ und „lockere Wohnbesiedlung“ unterschieden worden.

Für kleinmaßstäbige Karten (in unserem Beispiel 1:100 000 bis 1:500 000) läßt sich so erstmals lagegenau und nicht durch Symbole beeinträchtigt das Ausmaß der landesweiten Besiedlung darstellen. Gerade in diesen Maßstäben sind die minimalen Zeitverzögerungen bei konventionellen Karten mit über 3½ Jahren sehr groß.

Der nachfolgende Maßstabsvergleich zwischen Landeskarte sowie z. T. Spezialkarten und den speziell aufbereiteten Landsat-Klassierungen mag das Gesagte unterstreichen (Abb. 17 bis 21).

Eindeutige Vorteile ergeben sich im Aspekt der Darstellung für die Satellitenbild-Klassifikation bis zum Maßstab 1:100 000.

Ganz allgemein kann bemerkt werden, wie schlecht oft die thematische Kartographie das Flächenhafte in Bevölkerungs- bzw. Besiedlungskarten zum Ausdruck bringt.

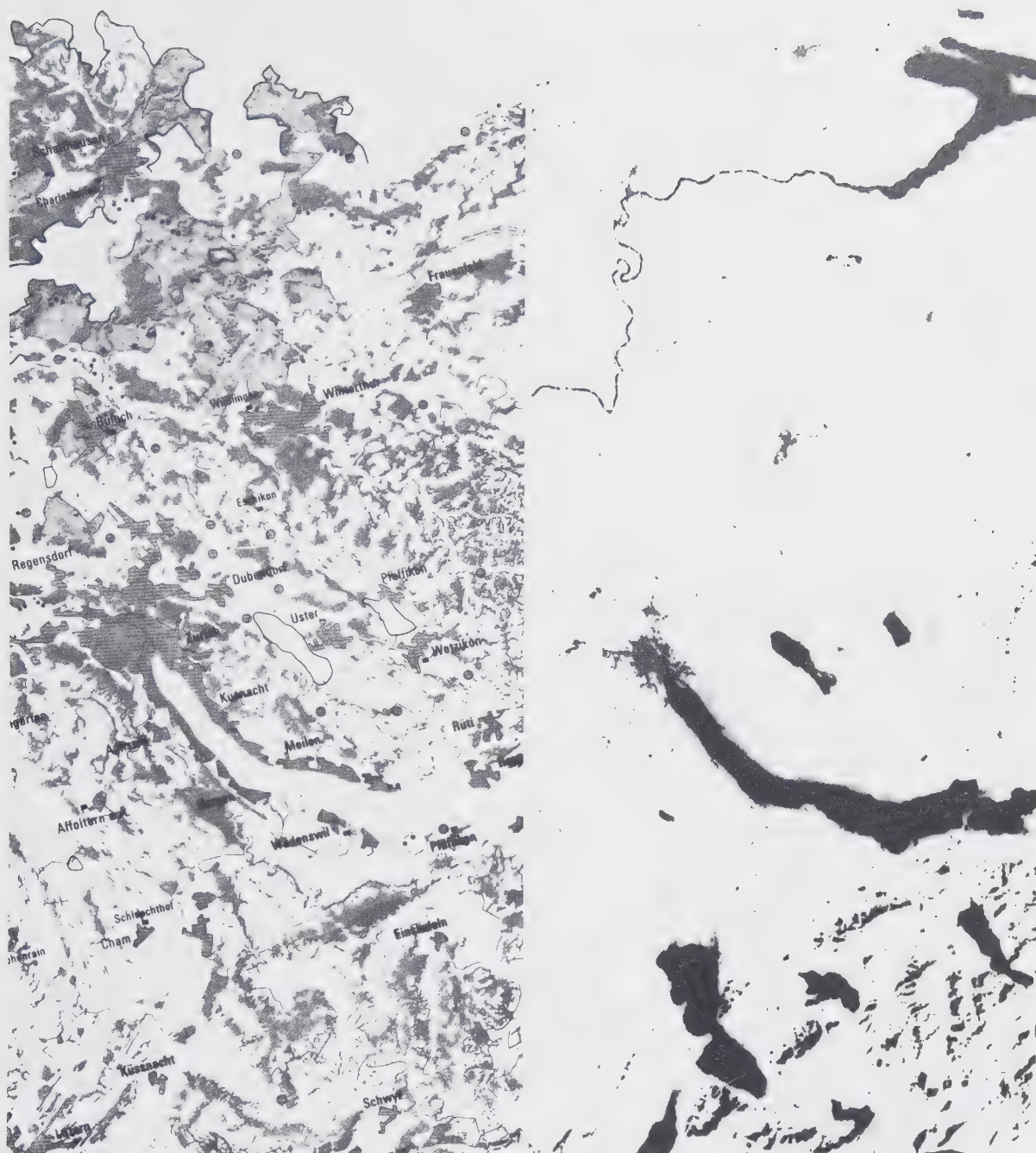


Abb. 17: Vergleich einer Landsat-Klassifikation der Klassen „dicht“ und „locker überbaut“ (dunkelgrau bzw. hellgrau) sowie „Wasser“ (schwarz), Stand 1972, mit dem Kartenblatt Nr. 48 „Landwirtschaft I“ des „Atlas der Schweiz“, Maßstab 1:500 000, 1977 (überbaute Flächen = schräg schraffiert).

Fehlklassierungen der Klasse „Wasser“ in steilem Gelände in Schattenpartien. Fehler der Klasse „locker überbaut“ am Greifensee (wegen Nebelstreifen) und allgemein im Sumpf/Riedland.

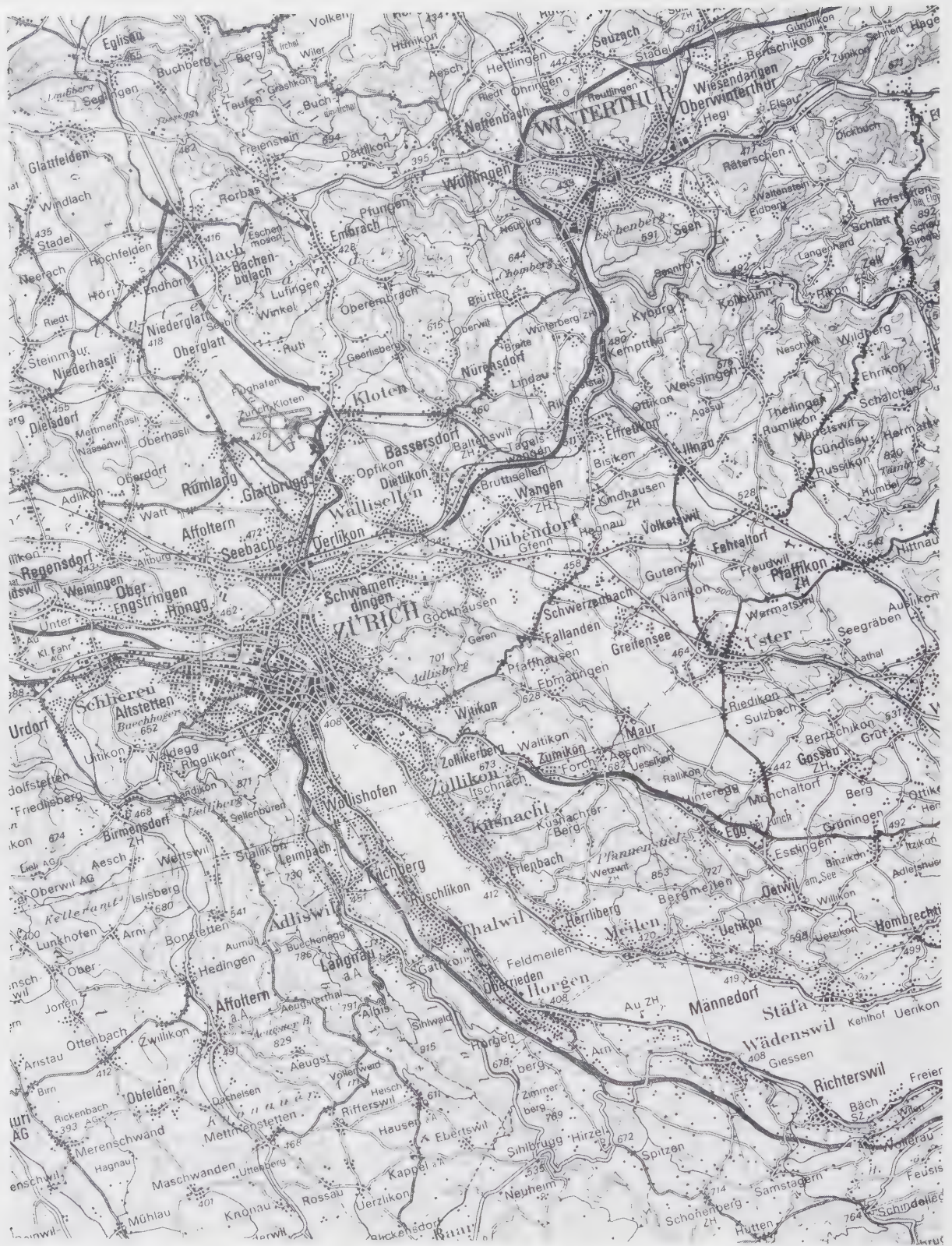


Abb. 18a: Ausschnitt Landeskarte 1:200 000, Blatt II, 1973. Vergleich der Darstellung des überbauten Gebietes.

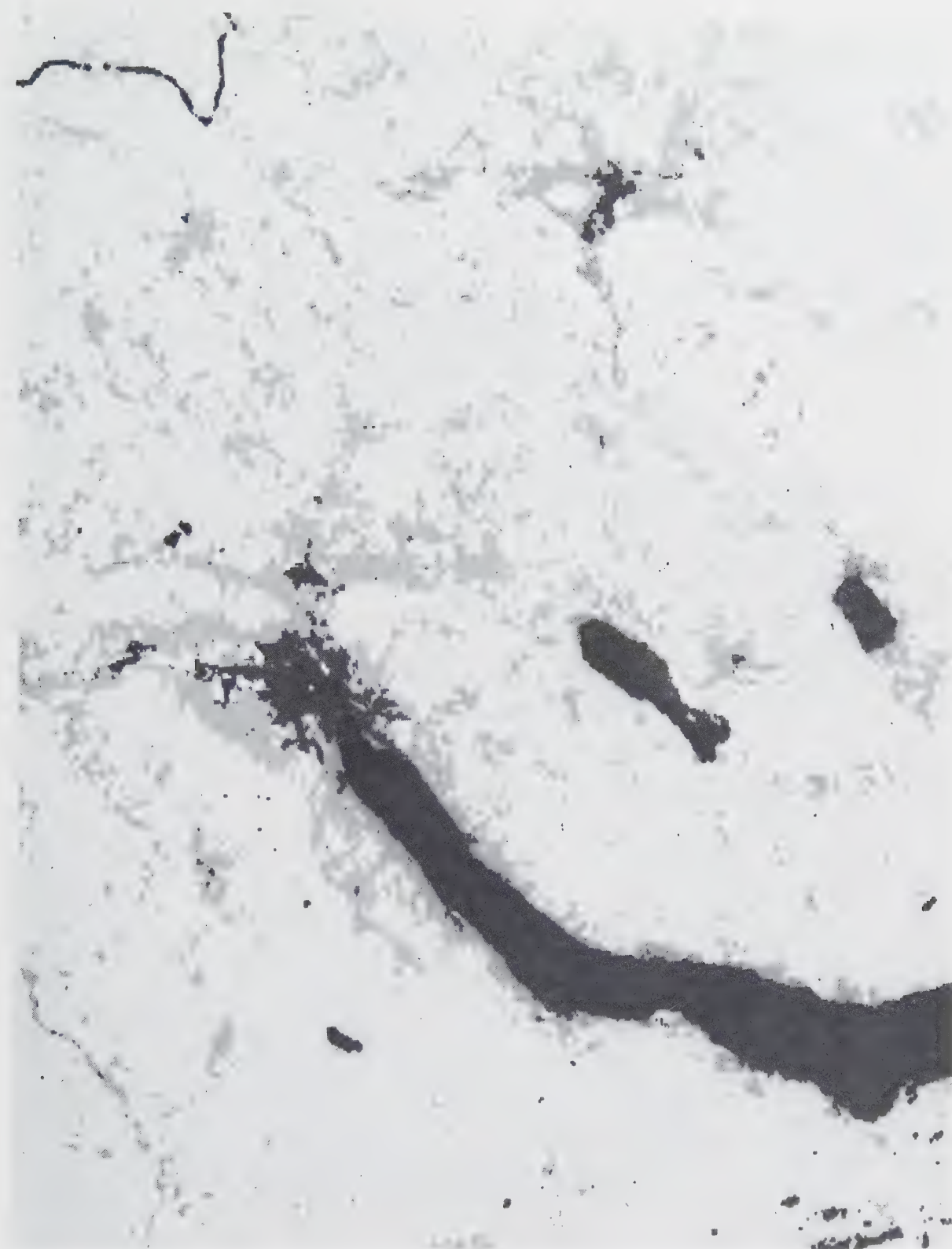


Abb. 18b: Landsat-Klassifikation 1:200 000, Raum Rhein-Zürich-Zug 1972, Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“ (dunkel- bzw. hellgrau) und „Wasser“ (schwarz).



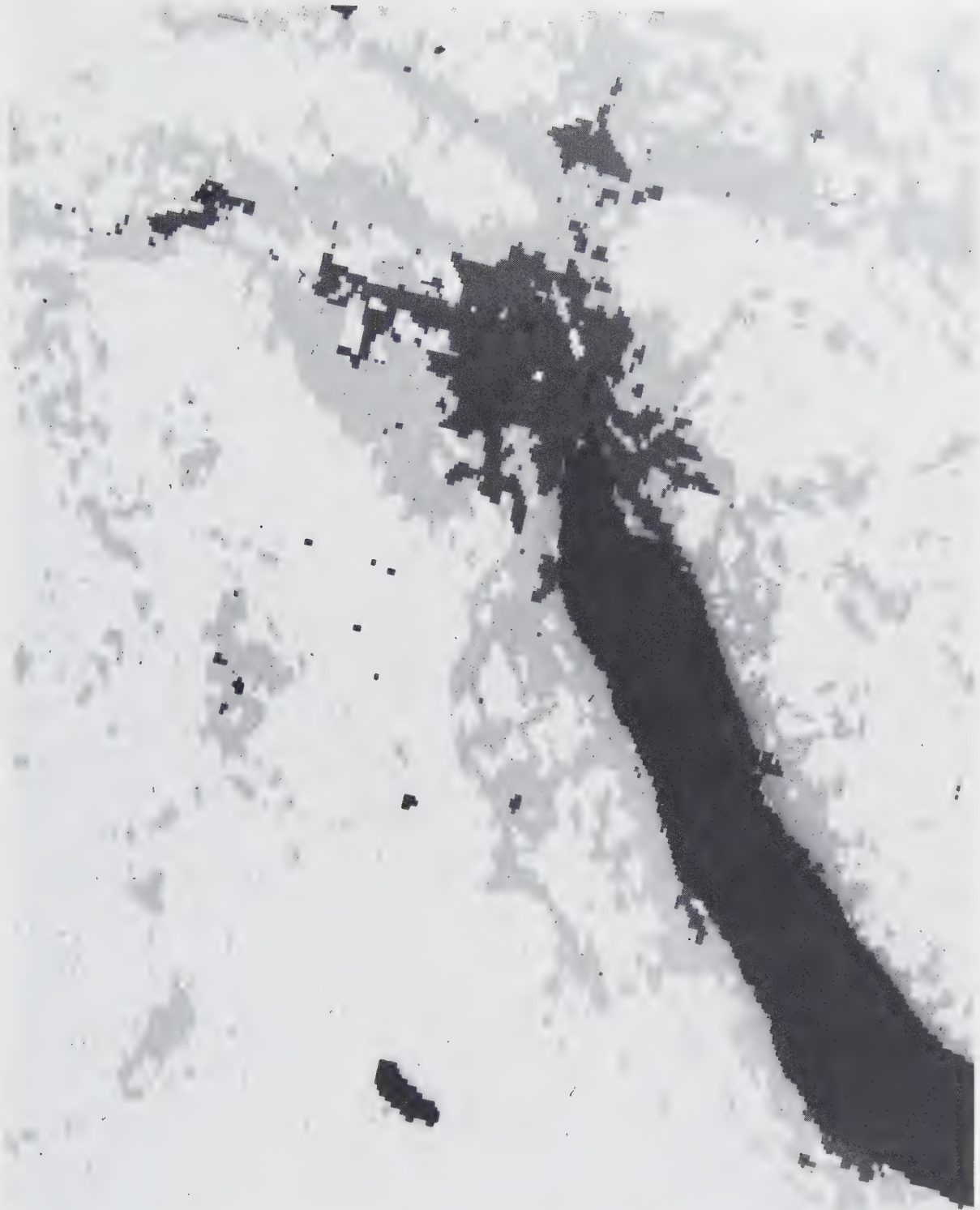


Abb. 19b: Landsat-Klassifikation 1:100 000, Raum Zürich, 1972. Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“ (dunkel- bzw. hellgrau) und „Wasser“ (schwarz).



Abb. 20a: Ausschnitt Landeskarte 1:50 000, Blatt Zürich, 1970. Vergleich der Darstellung des überbauten Gebietes der Stadt Zürich.

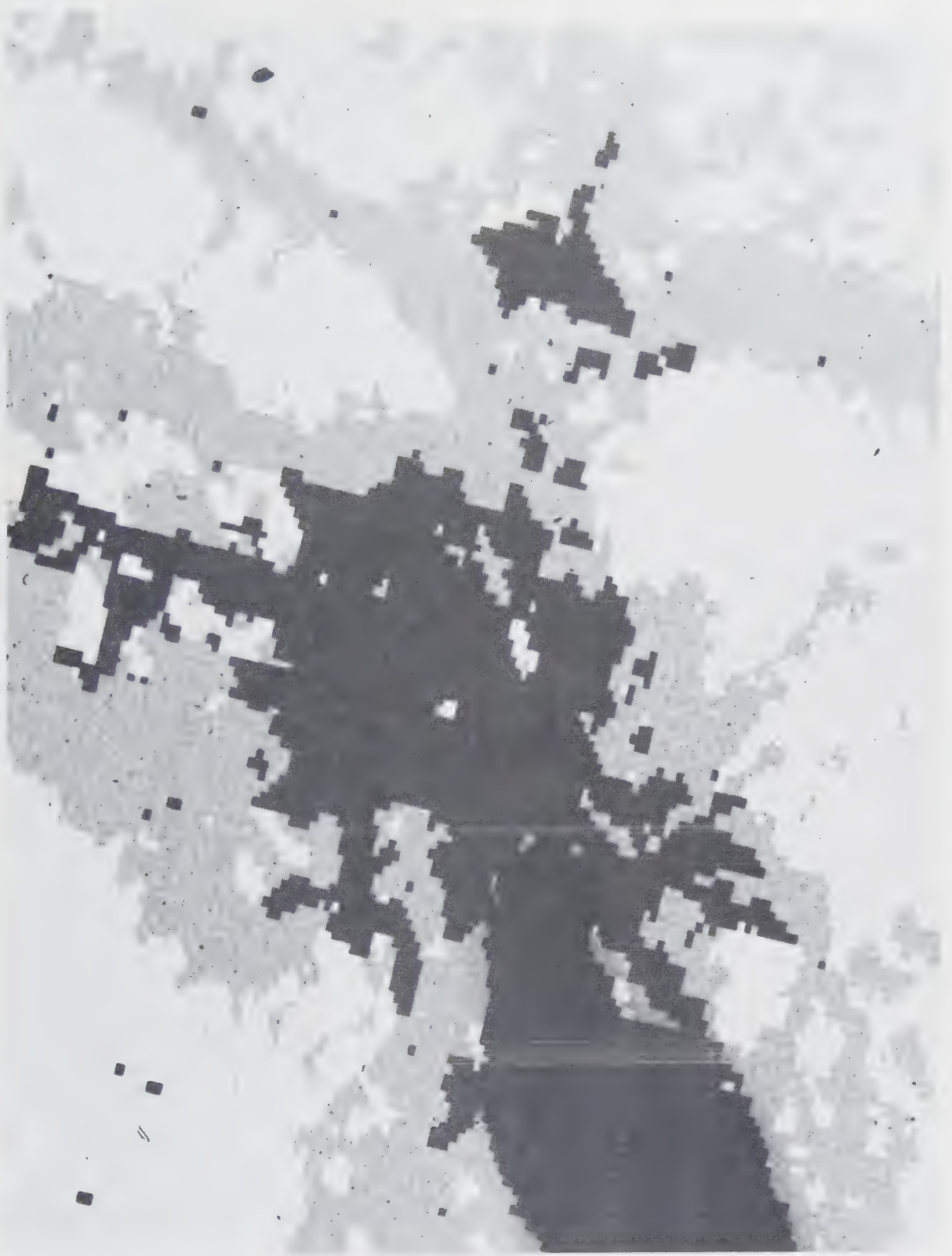


Abb. 20b: Landsat-Klassifikation 1:50 000, Stadt Zürich, 1972. Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“ (dunkel- bzw. hellgrau) und „Wasser“ (schwarz).



Abb. 21a: Ausschnitt Landeskarte 1:25 000. Blatt Winterthur, 1972. Vergleich der Darstellung des überbauten Gebietes der Stadt Winterthur.



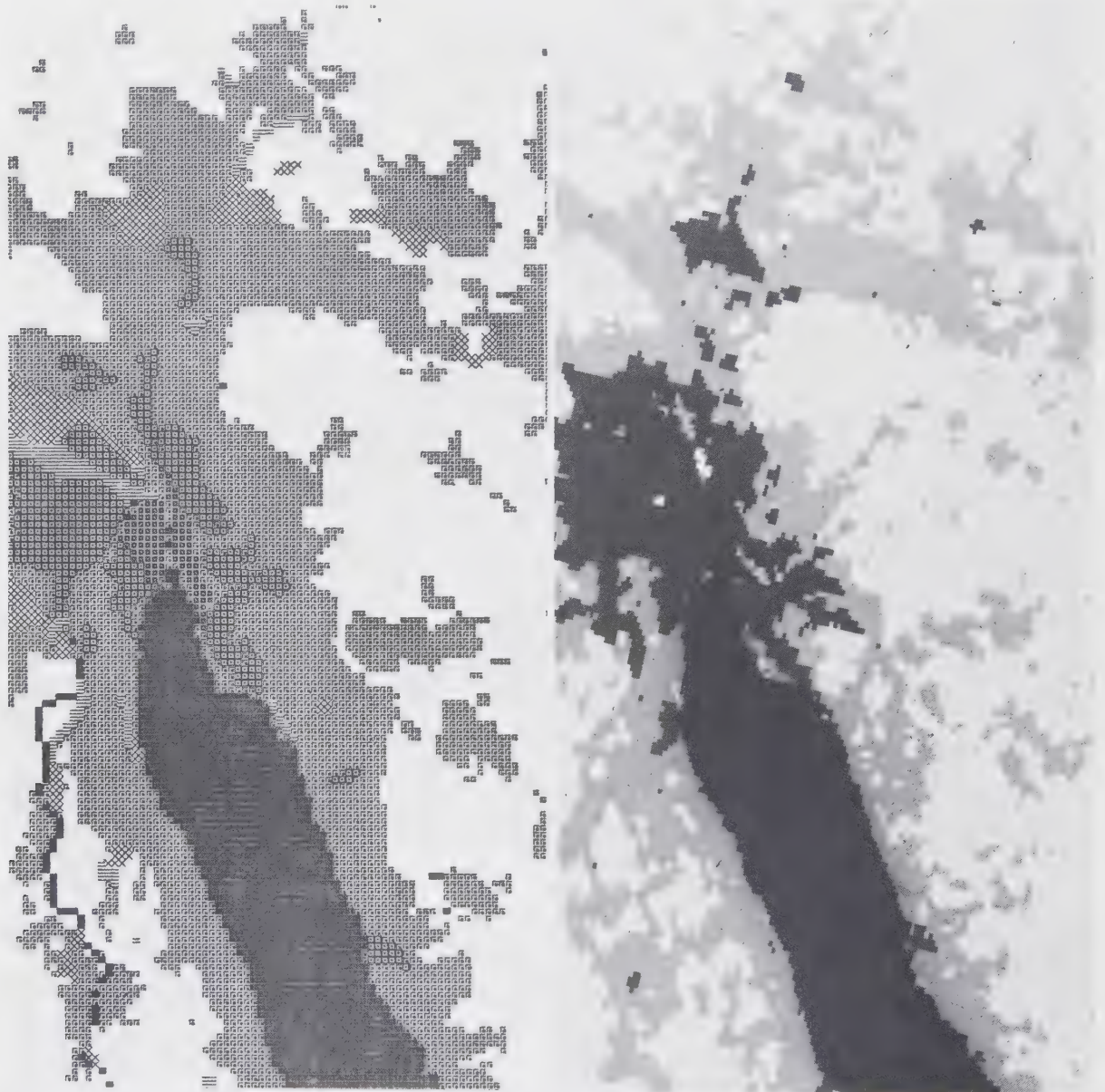
Abb. 21b: Landsat-Klassifikation 1:25 000, Stadt Winterthur, 1972, Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“ (dunkel- bzw. hellgrau).

4.3.2 Vergleich der Landsat-Klassifizierung des überbauten Gebiets mit dem Hektar-Informationsraster

Der Informationsraster, den das Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung der ETH Zürich (ORL) bis 1972 erstellte, und der nun am Eidg. Statistischen Amt weiterverwendet wird,

stellt eine landesplanerische Datenbank in einem Hektar-Rasternetz dar. In diesem Informationssystem wurden für uns hier relevant folgende Bodennutzungstypen bzw. Arealkategorien erfasst:

- Wies- und Ackerland, Obst- und Rebbau
- Weiden
- Wald



Legende: ORL-Raster



Flüsse und Seen
Zone hoher Bebauungsdichte
Zone mittlerer Bebauungsdichte
Zone niedriger Bebauungsdichte
Verkehrsanlagen
Industrieanlagen

Landsat-Klassifikation:

dicht überbaut = dunkelgrau
locker überbaut = hellgrau
Wasser = schwarz

Abb. 22: Vergleich eines Ausschnitts aus dem ORL-Informationsraster 1972 der Kategorien „Wasser“ und „überbautes Gebiet“ mit einer Landsat-Klassifikation Raum Zürich, 1972; Maßstab 1:100 000.

- Öd- und Unland
- Seen
- Flüsse (wenn mehr als 50 m breit)
- überbautes Gebiet in fünf Kategorien:
 - = hohe Überbauungsdichte
 - = mittlere Überbauungsdichte
 - = niedere Überbauungsdichte
 - = Industrieanlagen
 - = Verkehrsflächen

In Abb. 22 wird ein Vergleich eines Rasterausdruckes der Kategorien Wasser und überbautes Gebiet aus dem Informationsraster mit einer Landsat-Klassifikation gezeigt.

Dabei ist generell eine gute Übereinstimmung festzustellen. Unterschiede beruhen nicht allein auf Problemen der Klassifizierung des Landsat-Ausschnittes, wie sie in Abschnitt 5.4 beschrieben werden, sondern sind vielmehr die Ursache weiterer Faktoren.

So ist der Generalisierungsgrad beim Hektarraster größer, da einerseits die Rasterfläche mehr als doppelt so groß ist und andererseits rein technisch ein bereits stark generalisiertes Kartenbild noch einmal generalisiert wird. Dies wirkt sich stärker aus als die in Abschnitt 6.1 beschriebene und auch bei diesem Landsat-Resultat angewandte Filterung.

Hinzu kommt, daß, obwohl als offizielles Datum für den ORL-Raster 1972 angegeben wird, mit einem mittleren Ausgabedatum für die Landeskarten, auf denen das Informationsraster basiert, um 1965 gerechnet werden muß. Die Verschiebung dürfte allerdings im Bereiche von Großstädten etwas geringer sein.

Trotz dieser ungleichen Datenbasen wird in Abschnitt 5.3.5 ein direkter Flächenvergleich dargestellt und errechnet.

4.4 Anwendungsmöglichkeiten für die thematische Kartographie

Landsat-Landnutzungsklassifikationen können als kartenähnliche Produkte Anwendung finden. Wegen der mannigfachen geometrischen Verzerrungsfaktoren, die den Satellitenaufnahmen inne-liegen (s. Abb. 3), sind die entsprechenden Genauigkeitsansprüche allerdings etwas zurückzuschrauben.

Thematisch gesehen können insbesondere kleinmaßstäbige Klassierungen sehr wohl für verschiedene Landnutzungsklassen als Kartenersatz die-

nen. Vergleichbar mit z. B. der Landeskarte sind die Klassen „Wasser“ und „Wald“. Die Unterscheidung des Waldes in vorwiegend Laub- und vorwiegend Nadelwald stellt aber bereits eine Ausweitung zum normalen Karteninhalt dar. Bei großen Kartenmaßstäben kann die Besiedlungsfläche einigermaßen mit den Landsat-Resultaten verglichen werden. In bezug auf Aktualität sind hingegen bei den Karten doch Bedenken am Platze; dauert es für die 1 : 50 000er Karte doch immer noch zwei bis drei Jahre vom Aufnahmedatum, bis eine neue Kartenedition in den Händen des Benützers liegt (bei kleinen Maßstäben entsprechend länger). In diesem Sinne kann das Satellitenmaterial aktuelle Informationen liefern (s. Abschnitt 4.3).

Neue Aspekte der kartographischen Darstellung ergeben sich außerdem durch die Unterscheidung von vegetationslosen Flächen zu grüner Vegetation. Damit sind Möglichkeiten zur Erfassung dynamischer Vorgänge in intensiven Landwirtschaftszonen gegeben.

Ein sehr wichtiger kartographischer Bereich im Blick auf dynamische Vorgänge stellen die Schneekartierungen dar. Zu ihrer großräumigen Erfassung gibt es keine ökonomischen Alternativ-Möglichkeiten.

Allgemein liegen die Vorteile von mittels Satellitendaten erzeugten Kartenprodukten in ihrer Aktualität sowie im Aufwand/Kosten-Verhältnis, da die besprochenen Methoden bedeutend schneller und billiger in gewissen Kategorien zum Ziele führen.

Nachteilig wirken sich heute noch z. T. grobe Fehlklassierungen aus. Diese können dort auftreten, wo die Spektralkanäle gute Trennung verunmöglichen. Es ist aber zu erwarten, und das Projekt Landsat-D weist in diese Richtung, daß in zukünftigen Erderkundungssatelliten-Systemen den Fragen der Kanaldefinition mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird. Der Trend geht damit eindeutig hin zu besserem Auflösungsvermögen und mehr und enger definierten Spektralkanälen (Landsat-D, 7-Kanal-„Thematic Mapper“, 30 m Auflösung).

Vorteile der Anwendung von Satelliten-Scannerdaten zeigen sich in der Flexibilität in bezug auf Anpassungsmöglichkeit. Vom Maßstab von ca. 1 : 50 000 an sind die Resultate an beliebige kleinere Maßstäbe anpaßbar, da die Ursprungs- sowie auch die Resultatdaten in computerkompatibler Form vorliegen. Wie im Kapitel „Automatische Generalisierungsprozesse“ gezeigt wird, lassen sich neben unsystematischen und systematischen

Fehlern durch entsprechende Filterwahl auch maßstabsgerechte Generalisierungen durchführen.

Dem Daten- bzw. Resultatraster lassen sich jederzeit zusätzliche flächen- oder linienhafte Informationen überlagern und kombinierte Ergebnisse erzeugen. So wurden beispielsweise bei *Urfer* (1978) Landsat-Schneeklassierungen durch Überlagerung eines Höhenstufen-Kanals höhenabhängig durchgeführt und die so erhaltenen Werte einem Wasserabfluß-Modell zugeführt. Mit der gleichen Methode können beispielsweise digitalisierte Grenzen (Kantons-, Bezirks-, Gemeindegrenzen etc.) mit in den Raster integriert und Klassifikationsstatistiken auf die entsprechenden Flächeneinheiten bezogen erzeugt werden. Ein wichtiger Vorteil ist gerade diese Möglichkeit der einfachen und schnellen Bestimmung von Flächenanteilen und absoluten Flächen.

Das in Rasterform vorliegende Bilddatenmaterial ruft geradezu nach der Verwendung in einem umfassenden Informationsraster. Wie Voruntersuchungen von *Seidel* (1976) gezeigt haben, sind bei der Kombination von Landsat-Daten mit dem Hektarraster des ORL mannigfache Probleme aufgetaucht, da die statistisch von Katasterplänen und z. T. von Landeskarten gebildeten Kategorien von Oberflächentypen vielfach nicht geeignet sind, mit Landsat erfaßt zu werden.

Ganz allgemein schlägt *Geiser* (1978) vor, daß ein dem Satelliten Landsat angepaßtes neues Landnutzungsklassifikations-Schema definiert werden müsse. Das hätte den enormen Vorteil, daß nicht jeder, der sich mit Landsat-Landnutzungsstudien beschäftigt, neu erklären muß, was machbar und was nicht erzielbar sei. Denn der Gewinn an aktueller Information in gewissen Bereichen durch Landsat kann nur erkaufte werden durch gewisse Einschränkungen und Verluste! Abzuwägen, ob diese Verluste durch den Gewinn wettgemacht werden, bleibt Sache des Anwenders oder Benützers.

Nicht nur für die Kartographie ist der Bezug der Meßdaten zu digitalen Geländemodellen äußerst interessant. Auch biologisch-ökologische Untersuchungen z. B. zur Ermittlung von Biomassen, zur Überwachung von dynamischen Reifeprozessen, Schädlingsbefall etc. lassen sich großräumig durch Kombination von Landsat-Resultaten mit anderen Informationen angehen.

Für die Kartenherstellung bieten sich Vorteile durch die erwähnte Flexibilität der gespeicherten Resultate. Nicht nur können klassenweise Auszugsfilme oder Kombinationen davon in fast beliebigen Maßstäben spezifisch generalisiert und

bearbeitet erzeugt werden (z. B. am Optronics Photomation System), sondern es können auch geometrische Anpassungen an verschiedene Netzentwürfe etc. gerechnet und die Daten entsprechend dargestellt werden.

In der Resultat-Übersicht wird die Anwendung einer speziellen Technik zur Erzeugung thematischer Signaturkarten gezeigt (Abb. 50). Die Grundlage dazu bilden spezielle Maskierungen und photographische Konturtechniken, ausgehend vom digital erzeugten Klassifikationsbild.

Ganz allgemein kann zum Thema Kartographie mit Landsat-Klassierungen gesagt werden, daß wegen der Flexibilität auf der Datenseite bezüglich geometrischer wie auch darstellungstechnischer Art Benutzerwünsche vielfältig realisierbar sind.

4.5 Übersicht über bestehende großräumige Inventuren in der Schweiz

4.5.1 Hydrologie

Einem 1976 abgeschlossenen Gletscherinventar (*Müller* 1973), das u. a. unter Zuhilfenahme von Luftbildinterpretation erstellt worden ist, stehen seit 1967 periodische Versuche gegenüber, Wettersatellitenbilder zur großräumigen Erfassung der Schneegrenze zu verwenden. Statistisch werden auf konventionellem Wege landesweite hydrologische Abflußdaten erhoben.

4.5.2 Land- und Forstwirtschaft

Gegenwärtig sind Versuche im Gange, ökonomische Methoden zu ermitteln, mit denen die veraltete Eidg. Arealstatistik (1972) neu erhoben werden kann. Konventionelle Stichproben- und Luftbildinterpretationsverfahren stehen hier im Vordergrund.

Die alle fünf Jahre durchgeführten Betriebszählungen sind in der Eidg. Betriebsstatistik gesammelt und als Daten verwendbar.

Die landesweite Erfassung forstlicher Grundlegendaten soll im neuen Forstinventar mit Hilfe von Luftbildern und Stichprobennetzen durchgeführt werden.

4.5.3 Überbauungsforschung

Als Beispiel mag hier der Kanton Zürich aufgeführt sein, in dem alljährlich innerhalb des einge-

zonen Baulandes die tatsächlich überbaute Fläche im Maßstab 1 : 5 000 nachgetragen wird.

Außer dem Zonenplan im Maßstab 1 : 25 000, der aber keine effektive, sondern nur die potentielle (eingezonte) überbaubare Fläche neben der Basis-karten-Darstellung der Überbauung zeigt, fehlen kleinmaßstäbige synoptische Darstellungen größerer Räume.

4.5.4 Allgemeine Landnutzung

Das am Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung (ORL) bis 1972 erstellte und nun vom Eidg. Statistischen Amt verwaltete Hektar-Informationsraster wird leider nicht mehr nachgeführt. An sich stellt es einen sehr interessanten Versuch eines geokodierten Informationssystems dar. Vergleiche von Ausschnitten aus dem Hektar-Raster mit den Landsat-Klassierungen finden sich in Abschnitt 4.3.2

4.5.5 Thematische Kartographie

Hier bilden die in einem Sechsjahreszyklus jeweils neu geflogenen und nachgeführten Landeskarten 1 : 25 000 und 1 : 50 000 eine äußerst präzise, wertvolle und gute Grundlage. Gegeben durch diesen Zyklus, der sich bei kleineren Maßstäben entsprechend verlängert, werden dynamische Inventuren allerdings nur schwer durchführbar.

Hier bieten Methoden der Fernerkundung allgemein, und aus Kostengründen solche der Satellitenbildanalyse insbesondere, Möglichkeiten, ergänzend einzustehen.

4.6 Bisherige Arbeiten zur Landnutzungsklassifizierung mit Landsat-MSS-Daten in der Schweiz

Zu Beginn konzentrierten sich die Untersuchungen ganz auf die von der NASA akzeptierten Projekte der Schneeklassierung (*Haefner* 1975 und 1977). Als einer der ersten hat sich darin *Gfeller* (1975) intensiv mit den Problemen der analogen und digitalen Verarbeitung von schweizerischen Landsat-MSS-Daten beschäftigt. Namhaft unterstützt durch *Seidel* (1976) sowie *Binzegger* (1975) hat er die Verarbeitungsprobleme systematisch erfaßt und bezogen auf Schneeklassierungen erste Klassifikationen durchgeführt. „Hard- und software“-mäßige Beschränkungen – die Methoden zur Verarbeitung von digitalen Multispektral-scannerdaten waren bei uns erst in Entwicklung – führten zunächst zur Analyse grundlegender Fragen. Zum Beispiel machte er sich Gedanken über die wahre „Oberfläche“ alpiner Zonen und stellte Methoden der direkten Flächenzuordnung in Frage. Seine Untersuchungen über die Anwend-

barkeit von analogen photographischen Verfahren (1972 u. *Itten* 1972) zur Kartierung von Schneeflächen sowie diejenige digitaler Methoden zeigten die Schwierigkeiten der Dichtentrennung von Schnee, weil reliefbedingte Expositionsunterschiede die Daten mannigfaltig verändern.

Damals noch gebunden an die Diskriminanzanalyse ohne Grenzwert-Eingabe als Trennverfahren im digitalen Bereich kann das Endresultat, die Schneeklassierung, statistisch nicht ganz befriedigen; doch waren mit dieser Arbeit die Grundlagen zu weiteren Studien gegeben.

Stirnemann (1976) und *Urfer* (1978) haben die Schneeklassierungsverfahren soweit verfeinert, daß die so gewonnenen Resultate heute direkt Abflußprognosemodellen zugeführt werden können.

Stirnemann hat vor allem die Stichprobenzuordnung mittels Luftbilder und Bodendaten bearbeitet und, den Untersuchungen *Ittens* (1975) folgend, die Ausaperungs- oder Übergangszone erfaßt und statistisch aufgeteilt. *Urfer* seinerseits überprüfte die Möglichkeit der Zuordnung von prozentualer Schneebedeckung bezogen auf verschiedene Höhenstufenzonen, wie sie im Schneeabflußprognosemodell von *Martinec* (1976) gefordert werden. Sehr bald konnte dort gezeigt werden, daß digitale Schneeklassierungen von Landsat-Daten die Resultate analoger, auf der Basis von Luftbild-Orthophotos durchgeführter Dichtentrennverfahren erreichten, ja in einigen Fällen an Genauigkeit übertrafen. Das methodisch Neue bei *Urfer* war die Überlagerung der Vier-Kanal Landsat-Daten mit einem synthetisch, durch Digitalisieren von Höhenstufenkurven erzeugten Kanal. Damit war u. a. die Grundlage gegeben zur statistischen Erfassung beliebiger Polygonflächen.

Diesen Untersuchungen folgend wird nun im weiteren am Beispiel des Dischmataler versuchs, das Abflußmengen-Modell in einer Abtauperiode mit allen zur Verfügung stehenden Landsat-Daten des Frühjahres 1979 aufzudatieren. Danach sind eine sukzessive Ausweitung des Testgebietes bis auf das Einzugsgebiet des Rheins etc. und die Überprüfung der operationellen Eignung der entwickelten Verfahren geplant.

Gleichzeitig mit *Gfeller* hat sich *Binzegger* (1975) bei uns mit digitalen Landnutzungsklassifikationen im Raume Mailand beschäftigt. Auch er hat mit Unterstützung von *Seidel* am Photographischen Institut Grundlegendes geschaffen. Man könnte die hier vorliegende Arbeit am ehesten mit den Arbeiten *Binzeggers* vergleichen, sind doch die unterschiedenen Klassen beinahe die gleichen und

viele Probleme ebenfalls gleich geblieben. Grundlegend neu war bei *Binzegger* die Verbesserung der Klassifikationsergebnisse durch die Verwendung sogenannter Ratiovariablen, den Verhältnissen verschiedener Kanäle zueinander. Klassiert wurde nach dem gleichen Verfahren, das *Gfeller* benutzte, der Diskriminanzanalyse nach dem Verfahren BMD-07M der „Health Science Computing Facility (UCLA, California)“. Hier mehr als bei *Gfeller*, machte sich das Problem des Fehlens von Grenzwerteingaben (engl. thresholds) bemerkbar. Doch auch diese Arbeit muß im Lichte der damaligen Möglichkeiten beurteilt werden und bildete in vieler Hinsicht eine wertvolle Grundlage weiterer Forschung.

Während die erwähnten Arbeiten unter der Leitung von *Haefner*, zusammengefaßt in den ERTS- bzw. Landsat-Berichten an die NASA (*Haefner* 1975, 1977) Erwähnung fanden, so ist dies im schweizerisch-amerikanischen Skylab-EREP-Projekt insbesondere die Arbeit von *Muri* (1976, auch *Haefner* 1977). Der ihr zugrundeliegende Sensorträger mit Skylab war zwar ein anderer, und durch den 13-Kanal Multispektralscanner liegen Fragestellung und Problem anders, doch gehört sie trotzdem in den großen Kreis der systematischen Erforschung der Methodik der digitalen Landnutzungsklassierung und Erfassung der Schneedecke von Raumfahrzeugen oder Satelliten aus. *Muri* hat insbesondere gezeigt, wie wichtig auch in unseren Verhältnissen die Daten im Kanal von 1,55–1,75µm sind, um Schnee von Wolken trennen zu können.

Der Autor hat 1974 in den Vereinigten Staaten Schnee- und generelle Landnutzungsklassifikationen an verschiedensten Systemen (Abschnitt 5.2) vorgenommen und insbesondere methodische wie auch ökonomische Aspekte, die sich bei der Behandlung der erwähnten Probleme bieten, studiert und die Grundlagen, die zur vorliegenden Arbeit geführt haben, geschaffen.

Hierzu gehören die Schneeklassierungen in den Windriver Mountains (Bull Lake Creek und Dinwoody Creek, Wyoming, USA, 1974/1975) mit Larsys-3, Stansort-2 und Image-100, sowie parallelaufende Landnutzungsklassierungen des Raumes Zürich an den oben erwähnten Systemen unter Verwendung von überwachten (maximale Mutmaßlichkeit und Parallel-Epipet) sowie unüberwachten (Cluster)-Methoden (*Itten* 1975 a und b, 1977).

Aus diesen Erfahrungen hat sich die Notwendigkeit erwiesen, am Geographischen Institut der Universität Zürich ein modulares interaktives Bildverarbeitungssystem, IBIS (*Fasler* 1978), zu schaffen. Von Fasler wurde das System in enger

Zusammenarbeit mit den Benützern entwickelt und stand bereits 1976 operationell zur Verfügung. Bis heute ist es ständig erweitert worden – zuletzt mit dem Filter- und Generalisierungsverfahren, so daß es heute in seiner Flexibilität und seiner anwendergerechten Handhabung sowie technischen Eigenschaften keine Vergleiche mit Großsystemen zu scheuen braucht. Abb. 25 zeigt schematisch den Aufbau des Systems.

Nüesch (1977) hat in seiner Arbeit zur Landnutzungsklassifikation von Flugzeug-Multispektralscanner-Aufnahmen vor allem einen methodischen Beitrag zur Anwendung von verschiedenen Klassifikations-Algorithmen geleistet.

Neueste Untersuchungen von *Holmes* und *Nüesch* (1978a) befassen sich mit der spektralen Evaluation eines siebten Kanals für den „thematic mapper“ (TM) bei Landsat-D sowie mit einer Überprüfung der geologischen Anwendbarkeit eines zusätzlichen Thermalkanals (1978 b).

Sicher wäre die Liste der Beiträge zum Thema Landsat unvollständig ohne die Erwähnung von *Stänz'* Arbeiten (1976, 1978) zur Theorie und praktischen Durchführung von Spektralmessungen sowie zur Korrektur von atmosphärischen Störeinflüssen bei Landsat-MSS-Daten. Auch diese Methoden sind ins IBIS übertragen worden und stehen dem Benutzer heute zur Verfügung.

Einen wichtigen Platz in den Studien der geometrischen Probleme mit Landsat-Daten nehmen die Untersuchungen von *Lichtenegger* (1977) sowie *Lichtenegger, Seidel & Kübler* (1978) ein. Im Gegensatz zum hier gewählten Lösungsweg, einen großen Ausschnitt eines Landsat-Bildes mit einem einfachen Algorithmus ohne viel Vorverarbeitung zu klassieren und dann aufzubereiten, versucht *Lichtenegger*, einen kleinen Ausschnitt mit multitemporalen Verfahren durch Übereinanderlegen von Aufnahmen verschiedener Zeitpunkte und unter Verwendung von Clustermethoden möglichst präzise zu klassieren. Der Autor glaubt, daß beide Wege ihre Wichtigkeit und Richtigkeit unter den genannten speziellen Anforderungen und Voraussetzungen haben.

Wie bereits mehrfach angedeutet, entstanden die mehrheitlich bei *Haefner* durchgeführten Arbeiten fast alle in engster Zusammenarbeit mit *Seidel* und *Funkhouser* vom Photographischen Institut der ETHZ unter der vormaligen Leitung von *Berg*. Ohne die Abtast- und Aufbelichtungsmöglichkeiten am Optronics Photomation P-1700 System an jenem Institut und die große Unterstützung in theoretisch-methodischer und praktischer Hinsicht wäre es sicher nicht so schnell zur hier beschriebenen systematischen Entwicklung gekommen.

4.7 Weltweite Verwendung von Landsat-Daten zu Landnutzungs-Inventuren

Neben der im vorigen Kapitel angedeuteten Entwicklung der Tätigkeiten und Forschung in der Schweiz muß an dieser Stelle auf die immense Anzahl von Arbeiten zu diesem Themenkreis im weltweiten Rahmen hingewiesen werden.

Seit 1972, dem Start von ERTS-1, dem ersten Landsat, haben sich viele wissenschaftliche Fachbereiche – zuerst besonders in den Vereinigten Staaten – intensiv mit der Anwendungsforschung beschäftigt.

Schon das erste Symposium über Landsat-Untersuchungen (Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1, NASA-GSFC 1973) bewies aber durch die Vielzahl der durchgeführten Experimente das enorme, weltweite Bedürfnis nach solchen Daten. Allein die Zitierung der wichtigsten Arbeiten bis heute würde eine große Publikation ergeben, und es wäre vermessen, hier eine zufällige Auswahl vorzustellen. Darum sei auf einige Arbeiten, die im Zusammenhang mit der vorliegenden stehen, im Literaturverzeichnis hingewiesen, sowie auf die nicht enden wollende Serie von „Proceedings“ von Symposien über die Anwendung von Landsat-Daten zum Studium unserer Ökosphäre.

Hier sei nur hindeutungsweise auf einige periodisch wiederkehrende Symposien und Kongresse aufmerksam gemacht, in deren Akten sich die Entwicklung auf diesem Gebiet gut widerspiegelt:

- Symposien über „Remote Sensing of the Environment“ in Ann Arbor, Michigan, USA (1978 Manila, 1980 San José, Costa Rica)
- Symposien der „American Society of Photogrammetrie (ASP)“
- Symposien der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie (ISP)
- Symposium der Kommission VII, Bildinterpretation, der ISP
- Symposium der „European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL)“
- Symposien des „Committee on Space Research (COSPAR)“
- Spezielle Symposien und Publikationsserien von: NASA; NOAA; ESA; Environmental Research Institute of Michigan (ERIM) in Ann Arbor; International Training Center (ITC) in Enschede, NL; Purdue University in West Lafayette, Indiana; Jet Propulsion Laboratory in Pasadena etc.

Dem interessierten Leser sei neben unzähligen anderen z. B. die zu diesem Themenkreis recht um-

fangreiche Bibliothek des Geographischen Institutes der Universität Zürich nahegelegt. Weitergehende, sich insbesondere auf den amerikanischen Publikationsmarkt stützende Bibliographien sowie auch Computer-Auswertungsprogramme sind über COSMIC, Athens, Georgia sowie das Technology Application Center der University of New Mexico, Albuquerque, erhältlich.

4.8 Allgemeine Gedanken zum Thema großräumiger Landnutzungs-Inventuren mit Landsat-Daten

Ein generelles Wesensmerkmal vieler Arbeiten zum Thema Inventuren der Landnutzung scheint in einer Spaltung zwischen System entwickelnden Technikern und Wissenschaftlern und den eigentlichen Anwendern zu liegen.

Vielerorts sind heute, vor allem basierend auf amerikanischen Vorbildern, entsprechende Systeme aufgebaut worden. Der initialen Euphorie der Benutzer durch den Kontakt mit den neuen Methoden und dem Wunsche, ebensolches durchführen zu können, folgte oftmals die Ernüchterung, weil beim Transponieren der zunächst meist eingekauften Systeme und Technologien auf eigene Rechenanlagen große Schwierigkeiten zu überwinden waren. An vielen europäischen Forschungszentren hat man es relativ bald aufgegeben, die komplexen gekauften Systeme zu implementieren und den eignen Rechnern anzupassen. Einfacher war es, die grundlegenden Ideen umzusetzen und eigene, den praktischen Gegebenheiten angepaßte Verarbeitungssysteme aufzubauen. Dem Wunsche der Anwender nach Benutzerfreundlichkeit bei der praktischen Verwendung sowie, wenn möglich, eigenes interaktives Einwirken im Verarbeitungsprozeß zu ermöglichen, ist fast überall Folge geleistet worden.

Aber trotz dieses scheinbar fruchtbaren Dialogs zwischen Systemspezialisten und Anwendern sieht man immer wieder, wie zwar technisch hochstehende Verfahren perfekt durchexerziert, aber Resultate erzeugt werden, die vielfach erraten lassen, daß der Bearbeiter nicht vom Problem her an die Auswertung getreten ist. Die vielen „schönen, farbigen“ Klassifikationsergebnisse und Schlagzeilen in Zeitschriften, aber auch an Kongressen publiziert, haben mangels klarer Beweisführung und Genauigkeitsangaben dem ganzen Gebiet der Fernerkundung aus dem Raum enorm geschadet. Es kommt darum nicht von ungefähr, daß weltweit heute besonders jene Projekte Unterstützung finden, die auf problemorientierte, ökonomische, operationelle Anwendung hinzielen.

5 Landnutzungsklassifikation im Raume Zürich

Wie eingangs schon erwähnt, ist es das Ziel dieser Arbeit, zu untersuchen, wieweit eine großräumige, digitale Landnutzungsklassifikation einer multispektralen Landsat-Aufnahme unserer Breiten Nutzen bringen kann und welche Probleme sich in der Bearbeitung stellen. Es wurde bewußt darauf verzichtet, die Fragestellung mit multitemporalen Verfahren anzugehen.

5.1 Verwendetes Datenmaterial

Das zur Auswertung verwendete Landsat-1-Bild E-1076-09440 vom 7. Oktober 1972 (Lage s. Abb. 23) kann weder von der Datenqualität noch vom Aufnahmezeitpunkt her als ideal bezeichnet werden. Doch es stellte die erste wolkenfreie Landsat-Aufnahme der Schweiz dar, und an ihr wurden mannigfaltigste Tests in der Schweiz und in Übersee durchgeführt. Die Erfahrungen und Resultate haben auch heute noch die gleiche Aussagekraft, da sich bei Landsat-2 und -3 (beim letzteren wegen des Ausfalls des IR-Kanals) die Aufnahmetechnik nicht geändert hat. Erst mit Landsat-D, der vermutlich 1983 gestartet wird, wird sich eine Neubearbeitung wegen des besseren Auflösungsvermögens und der verfeinerten spektralen Auflösung mit sieben Kanälen aufdrängen.

An „Bodeninformation“ lag parallel zur Verarbeitung folgendes vor: Ein großmaßstäbiges, im Ok-

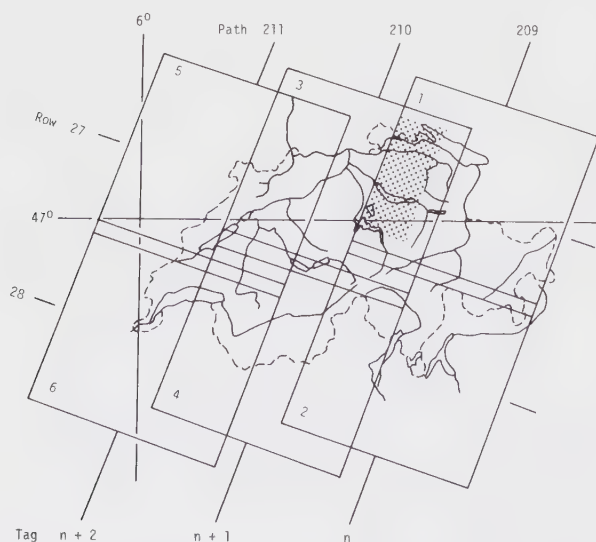


Abb. 23: Lage des verwendeten Aufnahme-Ausschnitts innerhalb des Bildes E-1076-09440 (Nr. 1 = Path 209, Row 27). Für eine Totalbedeckung der Schweiz sind sechs Bilder aus insgesamt drei Orbits (Paths) nötig.

tober 1972 erstelltes Luftbildmosaik des Raumes „Zürich und Umgebung“, Luftbilder des gesamten Raumes, aus der Literatur Luftbildbände — insbesondere für die Stichprobenwahl im überbauten Gebiet und für die Waldklassen, gebietsdeckend Landeskarten 1 : 25 000, 1 : 50 000 und 1 : 100 000 sowie viele Feldaufenthalte mit direkten Vergleichen im Gelände.

5.2 Wahl der Methode

Wie im theoretischen Kapitel „Bildverarbeitung“ gezeigt, gibt es verschiedene Methoden, das Problem digitaler Landnutzungserhebung anhand von multispektralen Daten anzugehen.

Die Überprüfung der Datenqualität zeigte einerseits unsystematische Datenausfälle verschiedener Detektoren und Streifeneffekte („Banding“) eines Detektors im Kanal 6. Der Korrektur, dem Debanding, konnte einigermaßen ausgewichen werden, da der Kanal 6 nur zur Diskriminierung der Klassen Nadelwald und Laubwald diente und darum nur dort gelegentlich Probleme auftauchen.

Die unsystematischen Datenausfälle sollten im Klassifikationsresultat durch Bildglättung ausgeglichen werden (s. Abschnitt 6.1).

Zur Verarbeitung gelangte ein Teil eines Landsat-Bildstreifens (1 Streifen = $\frac{1}{4}$ Bild), der ca. 1,3 Millionen Bildelemente und eine Fläche von ca. 5 000 km² umfaßte. Diese Datenmenge erforderte eine sorgfältige Überprüfung der Methoden in ökonomischer Hinsicht.

Tests, die der Autor am NASA Goddard Space Flight Center mit Larsys-3¹⁾, an der Stanford University (Stanford, California) mit dem System Stansort-II²⁾ und dem System „General Electric — Image-100“³⁾ mit diesem Bildmaterial durchgeführt hat, haben gezeigt, daß nur schnelle, einfache, überwachte Verfahren verantwortbar sein würden.

¹⁾ Larsys-3, System des Laboratory of Remote Sensing (LARS) der Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. Zugang über Remote Terminals von NASA, Wallops Islands, Virginia und NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA. „Maximum likelihood-point“ und „per-field classifier“ sowie iteratives Clustering.

²⁾ Stansort-II der School of Earth Sciences, Stanford University, Stanford, California, USA. Interaktives „halbüberwachtes“ Clustering nach der ersten Methode, wie sie im Fall 2 im Abschnitt „Digitale Bildverarbeitung“ beschrieben ist.

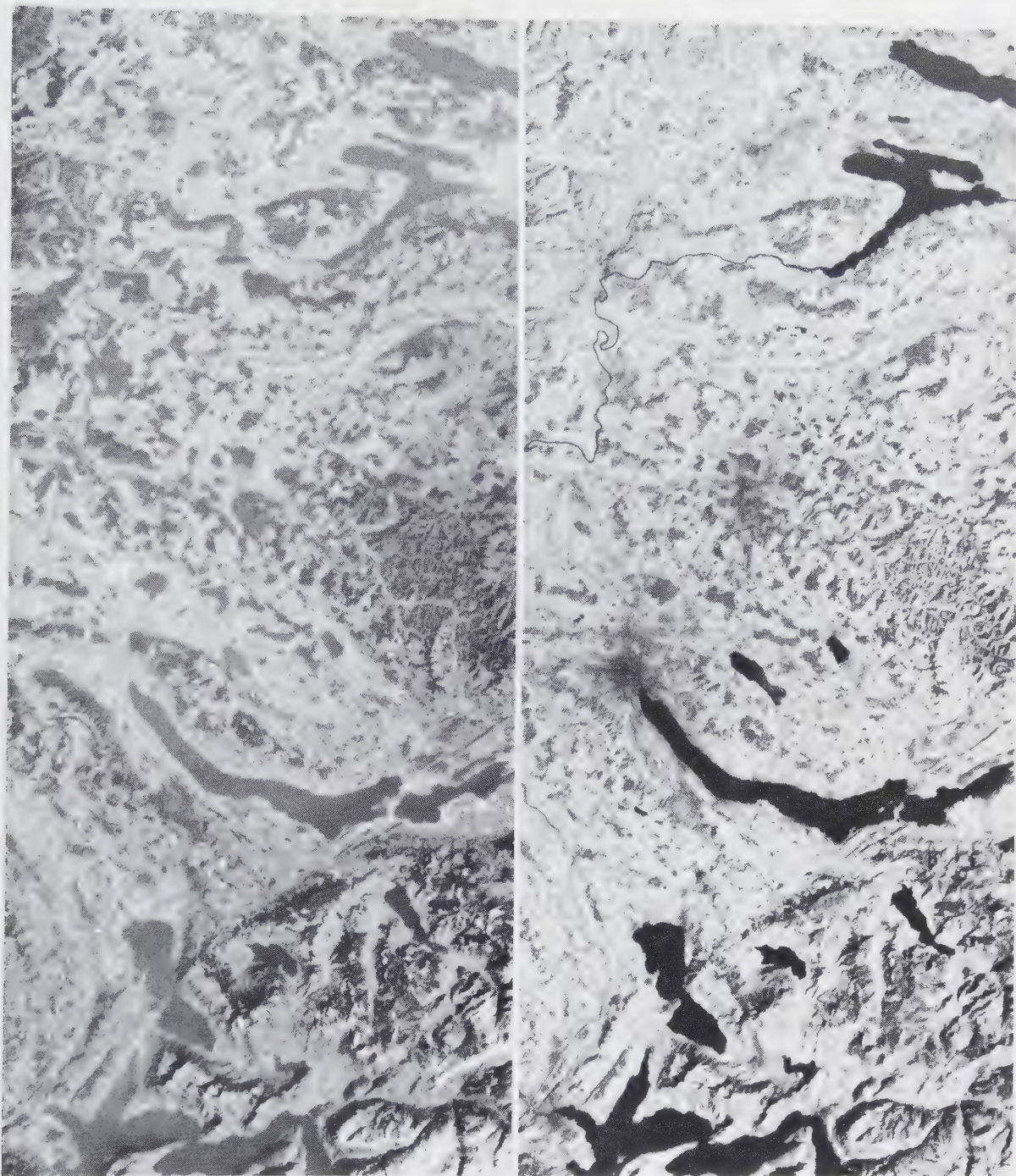


Abb. 24: Bilder des verwendeten Aufnahme-Ausschnitts, Kanal 5 links und 7 rechts, E-1076-09440 vom 7. Oktober 1972, Maßstab 1 : 500 000. Aufbelichtet am Optronics Photomation System des Photographischen Instituts der ETHZ.

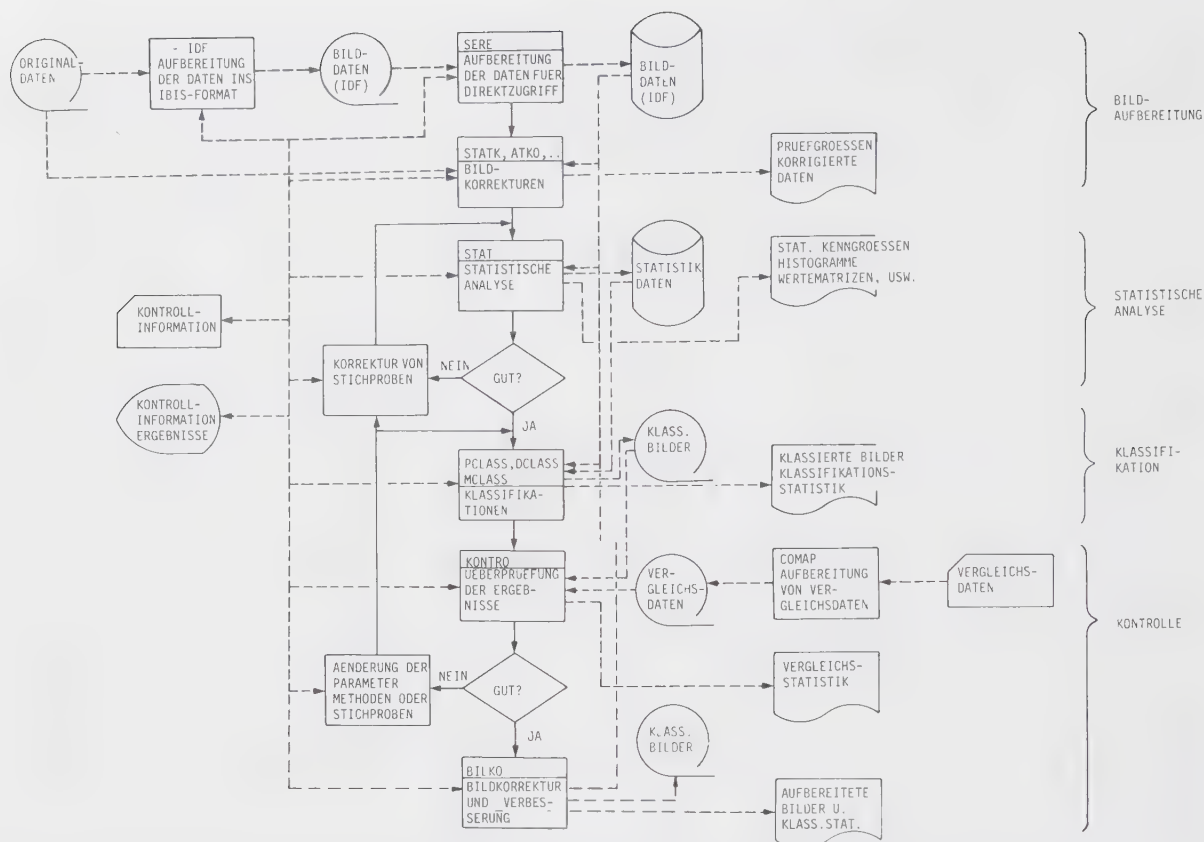


Abb. 25: IBIS, Interaktives Bild-Interpretations-System – Schema der Verarbeitungsfunktionen (Fasler 1978, mod.)

In Zürich standen zunächst für solche Aufgaben Parallel-Epipod (PDD) Prozessoren der Systeme PSU „ORSER“⁴⁾, IBIS⁵⁾ und Optronics⁶⁾ zur Verfügung. *Gfeller* (1975) und *Binzegger* (1975) hatten ein BMD-07M Diskriminanzanalyse-Programm bei ihren Arbeiten verwendet. Dieses wurde in unserem Fall wegen fehlender Grenzwerteingabe nicht weiter verwendet.

Unüberwachte „Cluster“-Verfahren wurden im Larsys-System überprüft, ergaben aber bei unverhältnismäßig hohen Rechenzeiten sehr schwer interpretierbare Resultate. Das Letztgesagte gilt auch für das interaktive Clustering in Stansort-II, obwohl dort die Rechenzeit weniger ins Gewicht fällt.

Die Klassifikation nach der Methode der maximalen Mutmaßlichkeit (engl. maximum likelihood) wurde mit dem Larsys-3-System und dem M-Class-Algorithmus von IBIS getestet. Die Resultate waren bei beiden Systemen sehr gut, aber der große Rechenaufwand rechtfertigte eine Anwendung dieser Methode bei großen Datenmengen nicht.

Der D-Class Algorithmus im IBIS (Zentroidmethode) zeigte bei schneller Verarbeitung gute Resultate. Die Abhängigkeit von Klassenmittelwerten jedoch erschwerte die Zuordnung bei Klassen nicht-normaler Häufigkeitsverteilungen.

Die P-Class Methode im IBIS (Rechteck- oder Parallel-Epipiped-Algorithmus) wurde schließlich verwendet, weil sie bei wenigen Kanälen und wenigen Klassen sehr übersichtlich und einfach in der Anwendung ist. Die Tests mit Image-100 hatten allerdings gezeigt, daß auch bei interaktiven „schnellen“ Bildschirm-Systemen die Statistiken sehr sorgfältig überprüft und der Verteilung von Stichproben über das ganze zu klassierende Bild große Beachtung geschenkt werden müssen.

Haberäcker (1978) kommt bei seinen sehr systematischen Untersuchungen zur Anwendung verschiedener Klassifikations-Algorithmen am DIBI-

³⁾ GE-Image-100, Interaktives Bildschirm-Bildverarbeitungssystem von General Electric, Beltsville, Maryland, USA, mit verschiedenen Algorithmen sowie auch einem einfachen Parallel-Epipip-Processor.

4) PSU „ORSER“ = Bildverarbeitungssystem der Penn State University mit verschiedenen Klassifikations-Algorithmen.

⁵⁾ IBIS = Interaktives Bild-Interpretations-System des Geographischen Instituts der Universität Zürich. Entwickelt von *Fasler* (1978) mit verschiedenen Klassifikations-Algorithmen (P-Class, D-Class und M-Class) sowie dem Generalisier- und Bildkorrektur-Modul (s. Abb.25).

⁶⁾ Optronics = Photomation P-1700 System der Optronics Corp. am Photographischen Institut der ETHZ, Abteilung Bildanalyse. Ein Bildabtast- und Aufbelichtungsgerät mit beschränkten Auswertefunktionen (PPD).

AS-System¹⁾ zum gleichen Schluß. Auch er empfiehlt aus ökonomischen Überlegungen heraus die Verwendung der Rechtecksmethode bei Landsat-Landnutzungsuntersuchungen.

5.3 Praktisches Vorgehen bei der digitalen Verarbeitung

5.3.1 Stichproben im untersuchten Bereich

Wasserflächen waren im ganzen Untersuchungsbereich ausreichend vorhanden, so daß diese Werte statistisch sehr gut abgesichert sind.

Stichproben wurden u. a. in folgenden Regionen vorgenommen: Bodensee-Überlingersee / Rhein-Pfäffikersee / Greifensee / Zürichsee mit Obersee / Zugersee / Aegerisee / Sihlsee / Vierwaldstättersee / Lowerzersee. Zusätzlich boten die Katzenseen (ZH) und der Türlerseer (ZH) Möglichkeiten, kleine Wasserflächen zu untersuchen. Ganz allgemein basierte man dabei auf Kartenmaterial.

Die beiden Bebauungskategorien wurden statistisch gestützt durch Erhebungen in Schaffhausen, Frauenfeld, Winterthur, Zürich, Rapperswil, Zug-Baar, Cham und Luzern durch Karten, Luftbilder und Feldbegehungen.

Nadel- und Laubwaldtrainingsflächen wurden im Raume Zürich durch das Luftbildmosaik ermöglicht, während im Raume Frauenfeld-Winterthur sowie Rigi, Rothenthurm und Rotsee verschiedene Luftbilder, z. T. auch aus Luftbildatlanten, zu Hilfe genommen wurden.

Grüne Vegetation als Sammelklasse stützt sich statistisch ebenfalls auf Luftbilder des Raumes Zürich (u. a. Flugplatz Dübendorf), Frauenfeld, Schindelegi, Pfäffikon (ZH) etc.

Die Klasse „vegetationslos“ beinhaltet sehr verschiedene Bodenbedeckungstypen. Neben abgerntetem oder gepflügtem Ackerland werden Großbaustellen (Bpl. Kloten), Kiesgruben und auch Autobahnen als solche klassiert. Erhoben wurden die Trainings-Stichproben mittels Luftbildern.

Die beiden letztgenannten Klassen umfassen gewollt ein breites Spektrum und sind daher auch im Resultat nur grob interpretierbar. Sie wurden denn auch in der Klassifikation als Sammelklassen ausgebildet und erhoben durch den sehr allgemei-

nen Charakter ihrer Umschreibung keine allzu großen Genauigkeitsansprüche.

5.3.2 Statistik

Vermittels der gewählten Stichproben und Klassen konnten statistische Grundlagen errechnet werden, die zur Beurteilung der Daten an sich sowie bei den Entscheidungen des weiteren Vorgehens benötigt wurden. Einzel-, Klassen- und Gesamtstatistiken wurden ermittelt, die Stichproben dort, wo extreme Abweichungen auftraten, erneut untersucht und korrigiert.

Die Art und Menge der Daten beeinflussen diese erwähnten Entscheidungen ebenfalls. Am Testbeispiel der Stadt Zürich und Umgebung wurden die folgenden Klassifikations-Algorithmen auf ihre Genauigkeit bei der Klassierung von Test-Stichproben untersucht:

- a) P-Class: Parallel-Epipip-Methode
- b) D-Class: Minimal-Distanz- oder Zentroid-Methode
- c) M-Class: Methode der maximalen Mutmaßlichkeit.

5.3.3 Eigenschaftsselektion

Obwohl im Kanal 6 Streifenbildung beobachtet werden mußte, wurde der Kanal letztlich verwendet und diente insbesondere zur Unterscheidung der Klassen Laub- und Nadelwald. Da nur vier Kanäle an Information vorhanden waren, mußte die Datenmenge nicht „a priori“ durch Kanalselektion reduziert werden. Beispielsweise ist dies aber bei Skylab/EREP-Daten, dem S191 13-Kanal Multispektralscanner, unumgänglich.

Die Probleme der Streifenbildung konnten durch den letztlich angewandten Algorithmus sowie einer Resultatfilterung mehrheitlich unterdrückt werden.

5.3.4 Klassifikation

Ausgehend von der Statistik wurden sämtliche im IBIS vorhandenen Verfahren der Klassifizierung geprüft. Mit dem M-Class kann man sehr schnell zu einem durchaus brauchbaren Resultat kommen. Die beiden Tatsachen aber, daß einerseits die Begrenzung der Klassifikationsräume für alle Klassen einheitlich sein mußte und daß andererseits das Verfahren relativ kostenintensiv ist, führten zum Entschluß, den besagten Algorithmus für großflächige Untersuchungen nicht zu gebrauchen.

¹⁾ DIBIAS = Digitales Interaktives Bildanalyse-System der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen

Nachteilig im erwähnten Beispiel prägt sich die Tatsache aus, daß Klassen mit nichtnormaler Verteilung unsymmetrisch erfaßt und eventuell in unerwünschtem Maße durch Nachbarklassen beeinflusst werden.

Bereits viel flexibler ist der Distanz-Algorithmus, der die euklidische Distanz eines Meßpunktes zu den entsprechenden Trainingsklassen-Mittelwerten als Entscheidungsmerkmal benützt. Die Distanz-Grenzwerte (Schwellenwerte, engl. „thresholds“) für die Zu- und Abweisung eines Meßpixels können dort klassenweise angepaßt werden.

Durch die bereits erwähnten „schiefen“, nicht-normalen Verteilungen wurde es aber nötig, in die Statistik einzugreifen und Mittelwerte und Standardabweichungen zu verschieben. Diese recht schwerwiegenden Eingriffe sowie die etwas höher liegenden Berechnungskosten verhalfen zum Entscheid, als Klassifikations-Algorithmus den Parallel-Epipid-Prozessor zu verwenden.

Gerade für große Datenmengen ist dieser sehr gut verwendbar, da billig. Er ist sehr anpassungsfähig, bedarf aber einer ausgedehnten Testphase mit Probeklassierungen. Er bietet als einziger Klassifikations-Algorithmus unter den verwendeten die Möglichkeit, Grenzen zwischen Klassen nur in jenen Kanälen festzulegen, wo es zweckmäßig und nötig ist – demnach Überbestimmungen zu vermeiden. Er ist im vorliegenden 4-Kanal-Fall und bei relativ wenigen Klassen theoretisch gut faßbar und wie u. a. auch *Haberäcker* (1978) feststellt, durchaus in der Lage, auch bei komplexen Anwendungen brauchbare Ergebnisse zu liefern.

An die Verwendung dieses Algorithmus bei großen Klassen und Kanalzahlen ist aber kaum zu

Klasse A

1	—						
2	4	—					
3	4	4	—				
4	4	2	—				
5	4	2	2	3	—		
6	4	4	4	4	4	—	
7	4	4	1	1+2	2	1	—
	1	2	3	4	5	6	7

Klasse B

Abb. 26: Trennkanal-Matrix, die für folgende Klassen angibt, in welchem Kanal (1-4 = Landsat-Kanäle 4-7) mit dem PPD-Classifer jeweils die Trennung vorgenommen wurde. 1 = Wasser, 2 = dicht überbaut, 3 = locker überbaut, 4 = Nadelwald, 5 = Laubwald, 6 = grüne Vegetation, 7 = vegetationslos. So wurden beispielsweise die Klassen „locker überbaut“ und „Laubwald“ (3 : 5) in Kanal 2 separiert.

denken, da die Übersichtlichkeit nicht mehr gewährleistet ist.

In unserem Fall wurde das Problem reduziert durch das Erstellen einer Trenn-Kanal-Matrix, die Aufschluß gibt über die notwendigen Entscheidungen (s. Abb. 26).

5.3.5 Genauigkeit

Das Problem der Klassifikationsgenauigkeit ist sehr komplex, da die Natur der Daten es mit sich bringt, daß sie schwer mit greifbaren Statistiken verglichen werden können. Gewisse Klassen wie z. B. *Wasserflächen* lassen sich in schweizerischen Verhältnissen gut mit vorhandenen Karten vergleichen. Je größer z. B. der See, desto genauer wird die klassifizierte Fläche (s. Abschnitt 5.4.1). Flüsse dagegen werden kaum erfaßt.

Nur in beschränktem Maße kann die *Waldfläche* mit z. B. großmaßstäbigen Landeskarten verglichen werden. Erstens müssen dann Aufnahme- und Aufnahmejahr der Photographien für die Revision der betreffenden Landeskartenausgabe und Landsat-Aufnahmedatum mehr oder weniger übereinstimmen. Wenn es beim Wald aber um die Unterscheidbarkeit von Nadel- und Laubwald geht, so stehen außer simultanen Luftaufnahmen keine Vergleichsmöglichkeiten zur Verfügung. Zweitens ist schon von der Definition des Begriffs „Wald“ (*Mahrer* 1976) her nicht zu erwarten, daß das Satellitenbild die gleichen Unterscheidungen, z. B. in Gebüsch und Wald, zuläßt.

Bei der Kategorie der *überbauten Flächen* bieten großmaßstäbige Landeskarten 1 : 25 000 und 1 : 50 000 durch die generalisierende Verwendung von Signaturen einige Probleme, während kleinere Maßstäbe, wie in der Gegenüberstellung (Abb. 17 bis 21) gezeigt, zum Vergleich völlig ungeeignet sind. Auf der anderen Seite haben Wohnsiedlungen mit vielen Bäumen, hohen Grünfaktoren sowie die Herbstverfärbung, kombiniert mit dem Rot der Dachziegel, sehr oft zu Fehlklassierungen in „Laubwald“ geführt.

Die Grobkategorien „grüne Vegetation“ (Herbstbild) sowie „vegetationslos“ sind an sich schwer zu fassen, da sie außerordentlichen Schwankungen unterliegen. Für den vorliegenden Fall bot sich ebenfalls die Verwendung von Luftbildern des Satellitenaufnahmezeitpunktes als Vergleichsbasis an.

Generell ist Vorsicht geboten bei der Verwendung von Zahlen der Arealstatistik des Eidg. Statistischen Amtes. Das haben Untersuchungen von

Trachsler (1973) gezeigt, und der folgende Vergleich verdeutlicht dies auch für den Informationsraster 1972.

Ganz allgemein muß dem Luftbild wegen seiner ähnlichen Aufnahmeperspektive und der möglichen Simultanität zum verwendeten Satellitenbild als Vergleichsbasis Vorzug gegeben werden. Da insbesondere für den Raum Zürich ein zeitgleiches Photomosaik vorhanden war, wurden die Landsat-Klassifikationen mit einer im gleichen thematischen Detail durchgeführten Luftbildinterpretation verglichen. Aber auch diese Photointerpretations-Daten sind mit gewissen Fehlern behaftet. Da die Auswertung nicht an einem Autographen erfolgte, sondern am halbkontrollierten Luftbildmosaik, lassen sich gewisse Verzerrungsfehler nicht vermeiden.

Bei der Verwendung sehr kleinmaßstäbiger, aus großer Höhe aufgenommener Schwarz-weiß-Luftbilder boten sich dann wiederum Erkennungsprobleme.

Die folgenden Vergleiche (Abb. 27 und 28) zwischen Schwarzweiß-Luftbild und Luftbildinterpretation, zwischen 1-Kanal Landsat-Bild und digitaler Klassifikation sowie einer Landeskarte und

dem entsprechenden Auszug aus dem Informationsraster sollen schon rein optisch die Probleme der verschiedenen Datenbasen aufzeigen. In Tab. 3 sind die ausplanimetrierten Flächenanteile im Vergleich dargestellt. Aufgrund der Erfahrungen kann angenommen werden, daß die Zahlen aus der Photointerpretation für das überbaute Gebiet und für Wald aus der Karte die höchste Genauigkeit aufweisen.

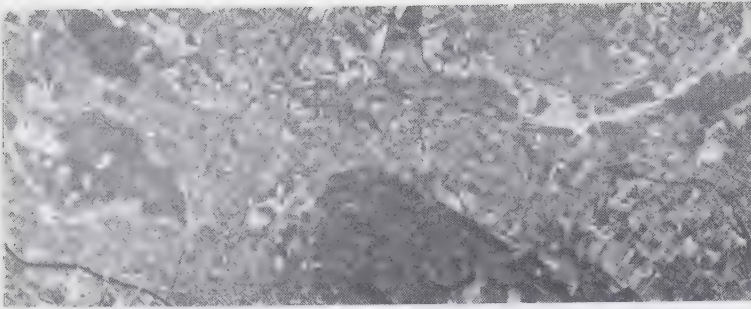
Weitere Abklärungen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Projekt Arealstatistik, sind auch in der Koordinationsgruppe Fernerkundung¹⁾ geplant. Das hier verwendete Bild läßt keine sehr viel detailliertere Klassifikation in zusätzliche Klassen zu.

Hier wurde die Klassenbildung den Bildgegebenheiten und dem System angepaßt und die betreffenden Fragen mit Hauptaugenmerk auf die besiedelten Flächen zu beantworten gesucht.

¹⁾ Koordinationsgruppe Fernerkundung, ein 1974 gegründeter Fachverband von vornehmlich Bundesstellen, die an der Anwendung von Fernerkundungstechniken interessiert sind. Mitglieder sind außerdem schweizerische Hochschulinstitute, die insbesondere in der Gruppe „Methoden der Fernerkundung“ mitwirken.

	Luftbild	Karte	ORL-Raster	Satellitenbild
Vergleich 1 (Fig. 28) Überbautes Gebiet	78	70	90	63
Vergleich 2 (Fig. 29) Wald	49	50	51	53

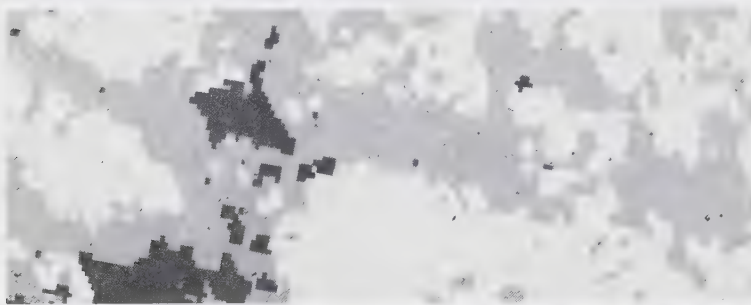
Tab. 3: Flächenvergleichstabelle (Zahlen in %)



Luftbild, Oktober 1972



Landsat-Bild 7. 10. 1972



Landsat-Klassifikation
des überbauten Gebietes
(Legende s. Abb. 22)

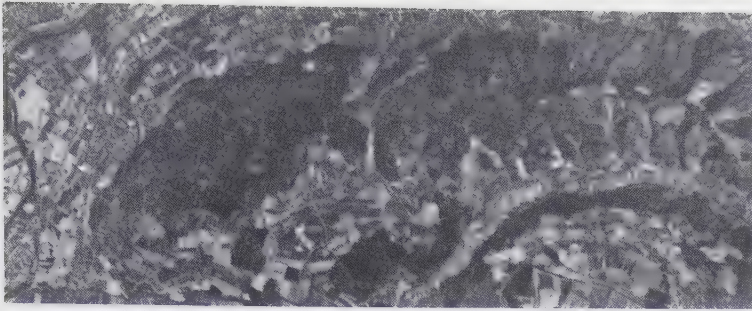


Ausschnitt aus Landeskarte
1 : 100 000
„Beromünster“, 1972

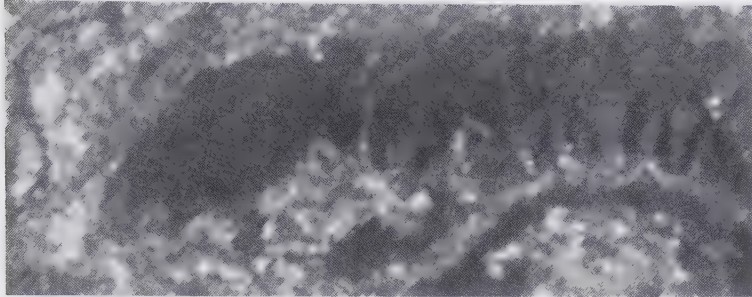


ORL-Informationsraster
1972, überbautes Gebiet
(Legende s. Abb. 22)

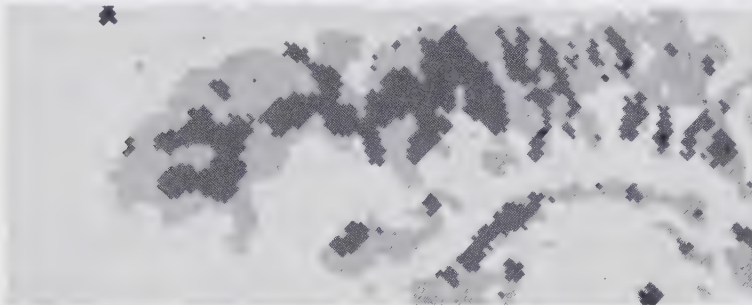
Abb. 27: Vergleich der Erfassung des überbauten Gebietes zwischen Luftbild, Landsat-Satellitenbild, Landsat-Klassifikation, Karte und ORL-Informationsraster, Raum Zürich Nord, Maßstab 1 : 100 000.



Luftbild, Oktober 1972



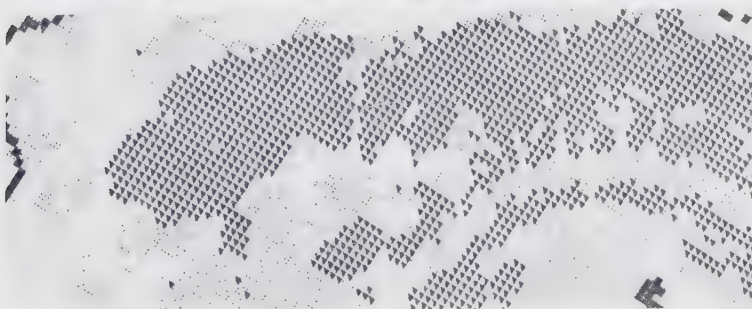
Landsat-Bild 7. 10. 1972



Landsat-Klassifikation
der Waldfläche,
dunkel = Nadelwald,
hell = Laubwald



Ausschnitt aus Landeskarte
1 : 100 000
„Beromünster“, 1972



ORL-Informationsraster
1972, Waldfläche (dunkel),
Wiesland (hell)

Abb. 28: Vergleich der Erfassung der Waldfläche zwischen Luftbild, Landsat-Satellitenbild, Landsat-Klassifikation, Karte und ORL-Informationsraster, Raum Albis-Reppischtal, Maßstab 1 : 100 000.

Schwierigkeiten hinzuweisen. Nehmen wir eine Anzahl theoretischer Klassen an, die im Eigen-schaftsraum quasi-normal verteilt sind. Je größer diese Klassenzahl, desto kleiner die Mittelwert-distanzen. Je größer die einzelnen Klassen, desto größer werden meistens die inneren Streuungen. Klassieren wir nun eine solche Population nach der in diesem Fall wohl geeignetsten Methode der maximalen Mutmaßlichkeit (maximum likeli-hood) und setzen die Schwellenwerte oder Grenzwertdistanzen möglichst groß ein, so wer-den sich diese Trenn-Hyperflächen irgendwo be-rühren, z. B. eventuell bereits bei zwei Standard-abweichungen Distanz zwischen zwei Klassen. Dies bedeutet, daß man schon rein statistisch auch mit dieser guten Methode nicht besser als bis ma-ximal 95,5 % der betreffenden Klassen-Elemente bestimmen oder klassieren kann.

Oft sind beim Abbilden der Natur mit einem ge-wissen Auflösungs-raster beinahe fließende Über-gänge zwischen Klassen zu verzeichnen. Wäh-rend dann zwar von den „reinen“ Stichproben ausgesagt werden kann, daß sie gut trennbar sei-en, so ist die Trennung im besagten Mischbereich immer etwas problematisch. Hinzu kommen Pro-bleme der Definition. Was ist ein Wald (*Mahrer* 1976)? Was ist noch zu überbauten Flächen zu zählen? Wo ist im Falle der Schneekartierung die exakte Schneegrenze?

Für den letzten Fall ist eine Konvention durchge-dungen. Die Schneegrenze verläuft innerhalb je-nes Auflösungselementes, in dem ein Gemisch von 50 % Schnee und 50 % Nichtschnee festge-stellt werden kann.

Diese aufnahmeseitig bestimmte Definition läßt sich im Falle von komplexen Klassenverhältnis-sen, z. B. Rand der überbauten Gebiete, kaum lö-sen. Denn wir wissen a priori nicht, welche und wie viele Grundklassen die Meßwerte eines Bild-elementes schließlich beeinflußt haben.

Diese Anmerkungen scheinen hier angebracht, weil bei der Klassierung von überbauten Gebieten Fehlklassierungen wegen der der Klasse inhären-ten Wichtigkeit viel schwerer ins Gewicht fallen, als wenn beispielsweise Fehler zwischen den Klas-sen „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“ vor-kommen.

Das hier Erläuterte hat grundsätzliche Richtigkeit für alle Klassen. Nur eine sehr sorgfältige Über-prüfung der Genauigkeit der Resultate vermag diese richtig zu gewichten.

Rein statistisch gesehen erlaubten die Landsat-Daten dieses Bildes eine Unterteilung des über-bauten Gebietes in eine Klasse „dicht“ und eine Klasse „locker überbaut“. Die Grenze zwischen

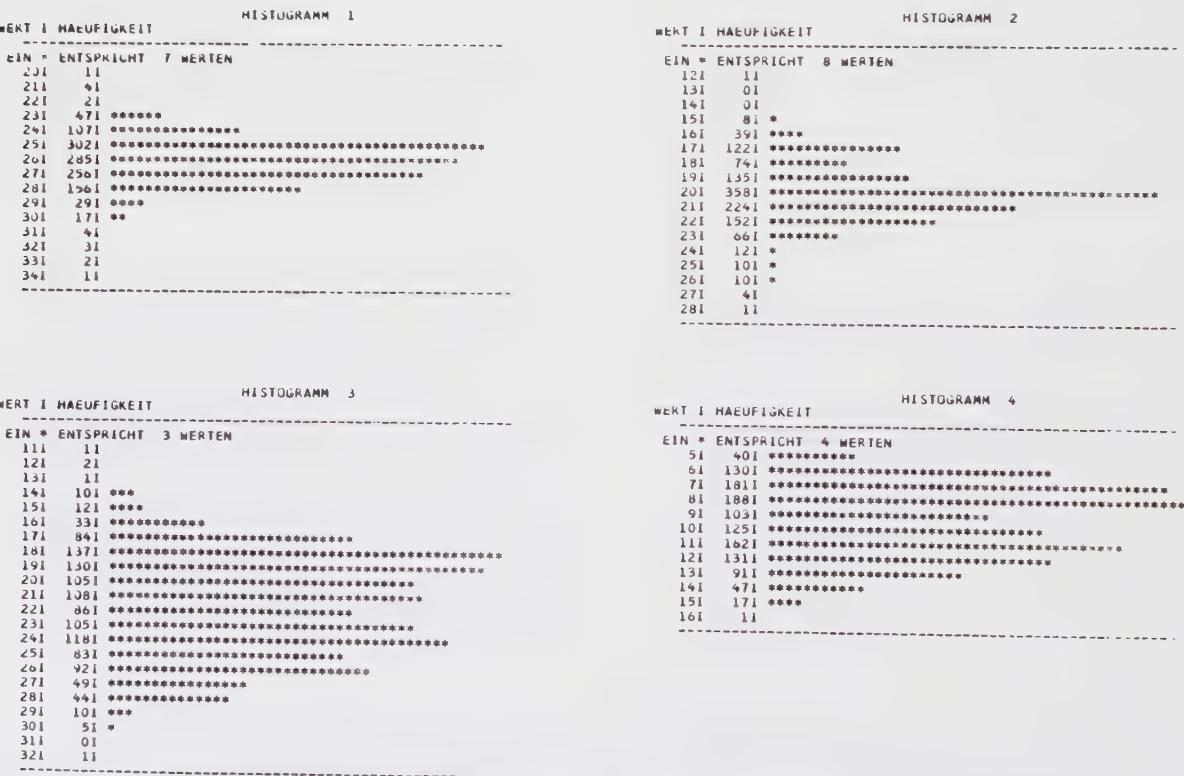


Abb. 31: Histogramme der Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“ (Hist. 1-4 = Landsat-Kanäle 4-7). Die Separierung der bei-den Klassen wurde in Kanal 7 durchgeführt.

diesen mußte statistisch und im Vergleich mit Luftbildern gezogen werden. Sie vermag nicht im ganzen Untersuchungsraum zu befriedigen, doch sind durch diese Unterteilung meistens Stadtzentren und die Zentren größerer Ortschaften erfaßt worden. Direkte Rückschlüsse auf formal-funktionale Gesichtspunkte (wie CBD-Abgrenzungen etc.) sind aber aufgrund der Datennatur nicht zulässig. Die Unterteilung wurde aber beibehalten als Versuch einer gewissen Strukturierung des überbauten Gebietes.

Offensichtlich unterscheiden sich die beiden Klassen im Grünflächenanteil, der sich besonders in der Signaturdifferenz in Kanal 7 bemerkbar macht (Abb. 31).

Damit ist das Kapitel der Möglichkeiten der Anwendungen von Landsat-Klassifikationen im urbanen Bereich sicher noch nicht ausgeschöpft. Eine detailliertere, intensive Fallstudie an einer Stadt mit allem zur Verfügung stehenden Datenmaterial wäre sicher sehr nützlich. International gibt es Versuche zu diesem Themabereich (z. B. über Washington D. C., *Christenson* 1977), doch sollten diese Untersuchungen auch an unseren Städten unter unseren Bedingungen durchgeführt werden. Multitemporale Überlagerungstechniken könnten uns dann direkt ermöglichen, Veränderungserkennungen durchzuführen.

Allgemeine Klassifizierungsprobleme der Klassen „dicht“ und „locker überbaut“ ergaben sich außer dem bereits erwähnten offenen Signaturkonflikt überall dort, wo in Mischpixeln die Fremdkomponenten stark einwirkten. Beispiele von Fehlklassierungen durch Mischpixel:

- dicht/locker überbaut + Wasser = Nadelwald
- locker überbaut + Grasflächen + Bäume = Laubwald
- Laubwald + Waldschatten + grüne Vegetation = locker überbaut
- Wiesland + Straßenkreuzungen = locker überbaut
- etc. . .

Es liegt nun ganz am Bearbeiter, Grenzen der Akzeptierbarkeit zu setzen und die Klassifikationsparameter entsprechend zu beeinflussen, damit ein vertretbares Resultat in genau definiertem Genauigkeitsrahmen entsteht.

5.4.3 Problem Wald

Insbesondere bei der hauptsächlich verwendeten Herbstaufnahme vom Oktober 1972 kann man schon in Einzelkanalbildern (Abb. 23) erkennen,

daß die Abgrenzung von Waldflächen möglich sein sollte. Was sich in den Kanälen 4 und 5 als relativ homogene Flächen darbietet, wird in den Kanälen 6 und 7 deutlich in mindestens zwei Gruppen aufgeteilt. Es liegt nahe, diese als Nadel- bzw. Laubwald zu bezeichnen. Diese Bezeichnungen sind allerdings „sensu stricto“ im vorliegenden Falle nicht verwendbar.

Der Wald in den untersuchten Gebieten setzt sich zusammen aus Mischwäldern und mehr oder weniger kompakten Fichtenbeständen. Es scheint deshalb angebracht, die Bezeichnungen der Klassen in „vorwiegend Laubwald“ und „vorwiegend Nadelwald“ umzuändern.

Statistisch gesehen läßt sich der Wald in zwei deutlich getrennte Gruppen unterteilen. Die Abgrenzung von Laubwald gegenüber Nadelwald wurde in Kanal 6 vorgenommen. Die Grenze mußte auf rein statistische Weise gezogen werden und ist demnach etwas problematisch (Abb. 32).

Aber auch der M-Class-Algorithmus brachte kaum Änderungen; daher wurde die Klassifikation mit dem PPD-Verfahren in der beschriebenen Weise vorgenommen.

Während der Nadelwald gegenüber den anderen Klassen kaum Probleme bot, so waren die Verhältnisse beim Laubwald, insbesondere zu grüner Vegetation und Gebüsch, relativ schwierig. Nur die sehr genaue Überprüfung der Zwischenergebnisse der Klassierungen anhand von Luftbildern, Karten etc. ermöglichte schließlich eine einigermaßen brauchbare Lösung.

Gewichtige Überschneidungen ergaben sich auch mit der Klasse „locker überbaut“. Insbesondere haben ausgesprochene Wohnzonen und Einfamilienhauszonen wegen der relativ großen Freiflächen-Anteile keine eindeutigen Signaturen. Da sich zusätzlich durch die herbstliche Verfärbung der Laubbäume Probleme mit der Vermischung der roten Ziegeldächer ergeben, muß versucht werden, dieses Problem mit Daten anderer Jahreszeiten zu lösen.

Der Klassifikations-Algorithmus stützt sich bei der Satellitenbildanalyse vor allem auf spektrale und räumliche Phänomene. Hingegen ist es wegen des Auflösungsvermögens nicht möglich, Texturen in der Größenordnung von Dezimetern und Metern (Struktur eines Waldes von oben betrachtet) zu erfassen. Darum gibt es mit Landsat-Daten keine Möglichkeit, zwischen Buschwerk, Obstbaumkulturen und Wald zu unterscheiden. Die Fragestellung ist deshalb auch nicht opportun. Daher rühren z. T. Unterschiede in den als „Wald“ klassierten Flächen auf den Satellitenbil-

HISTOGRAMM 1	
WERT I HAEUFIGKEIT	

EIN * ENTSpricht	4 WERTEN
14I	1I
15I	14I ***
16I	33I *****
17I	14I ***
18I	1I
19I	48I *****
20I	186I *****
21I	109I *****
22I	44I *****
23I	15I ***
24I	34I *****
25I	2I
26I	1I

HISTOGRAMM 2	
WERT I HAEUFIGKEIT	

EIN * ENTSpricht	3 WERTEN
7I	8I **
8I	20I *****
9I	19I *****
10I	18I *****
11I	41I *****
12I	127I *****
13I	139I *****
14I	88I *****
15I	38I *****
16I	1I
17I	2I
18I	0I
19I	0I
20I	1I

HISTOGRAMM 3	
WERT I HAEUFIGKEIT	

EIN * ENTSpricht	2 WERTEN
10I	1I
11I	4I **
12I	8I ****
13I	20I *****
14I	25I *****
15I	40I *****
16I	38I *****
17I	67I *****
18I	71I *****
19I	34I *****
20I	13I *****
21I	20I *****
22I	23I *****
23I	39I *****
24I	40I *****
25I	30I *****
26I	20I *****
27I	8I *****
28I	1I

HISTOGRAMM 4	
WERT I HAEUFIGKEIT	

EIN * ENTSpricht	3 WERTEN
5I	4I *
6I	29I *****
7I	83I *****
8I	137I *****
9I	63I *****
10I	11I ***
11I	36I *****
12I	38I *****
13I	57I *****
14I	33I *****
15I	9I ***
16I	2I

Abb. 32: Histogramme der Klassen „Nadelwald“ und „Laubwald“ (Hist. 1—4 = Landsat-Kanäle 4—7). Deutlich sind die beiden Klassen separierbar.

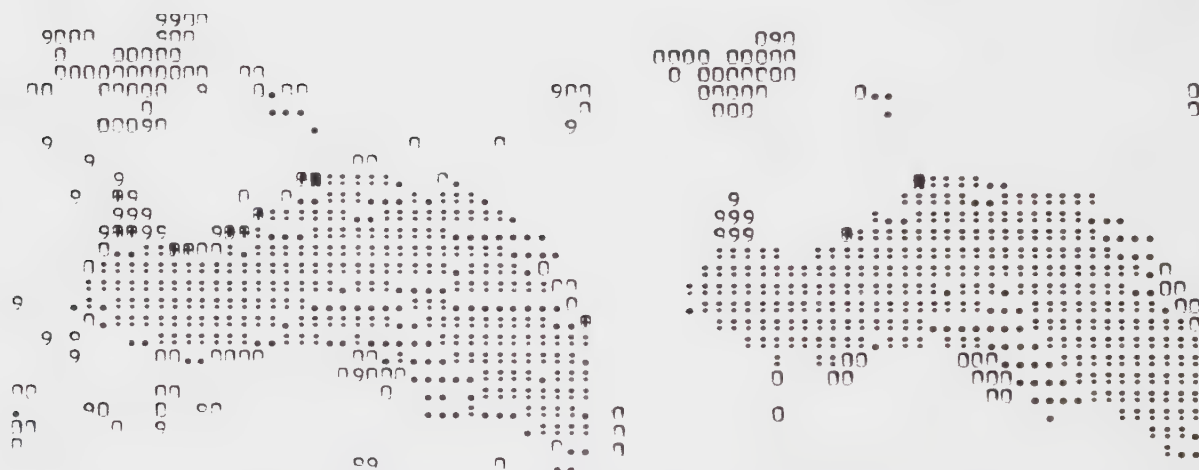


Abb. 33: Im linken Bild lassen sich Fehlklassifizierungen in „überbaut“ (Sign. 0 und 9) am Nordwestrand eines Waldes (Sign. : und .) erkennen, die durch Waldrandschatten erzeugt wurden. Durch eine in Abschnitt 6.1 beschriebene räumliche Filterung konnte das Problem, wie das Bild rechts zeigt, weitgehend gelöst werden.

dern zu den Waldflächen in schweizerischen Landeskarten.

Ein ganz spezielles Mischpixelproblem ergab sich durch die Waldrand-Schatten an den Nordwest-Rändern der Wälder. Die Waldschatten, am Aufnahme-datum im Oktober bei 33° Sonnenhöhe, erreichten immerhin bei 20 m hohem Wald eine

Breite von 31 m. Diese dunkleren Streifen, meist auf grüner Vegetation oder auf gepflügtem Ackerland resp. unproduktivem Land, ergeben in der Mischung sehr oft die Signatur für „locker überbautes Gebiet“ (Abb. 33). Durch spezielle Filterverfahren konnte ein Großteil dieser Fehlklassifizierungen beseitigt werden (Abschnitt 6. 1 sowie *Itten & Fasler* 1979).

5.4.4 Probleme mit den Klassen „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“

Da beide Klassen als „Sammelklassen“ ausgebildet wurden, stellten sich die Probleme höchstens definitorisch. Alles was „grün“ war (Kanal 5 relativ dunkel, Kanäle 6 und 7 relativ hell) und nicht Nadel- bzw. Laubwald darstellte, wurde zur Klasse „grüne Vegetation“ gezählt. Im Untersuchungsgebiet nimmt sie fast 50 % der Fläche ein. Da sich für den Zeitpunkt der Satellitenaufnahme im Oktober auch keine weitere landwirtschaftliche Unterteilung aufdrängte, wurde versucht, ausgehend von den statistischen Stichproben, die grüne Vegetation möglichst lückenlos zu erfassen. Weniger verbreitet dagegen mit ca. 3,5 % waren gepflügte Äcker und anderes vegetationsloses Areal. In diese Klassen fallen auch Groß-

baustellen, Kiesgruben etc. (s. Flughafen Kloten und Autobahn bei Cham), so daß sich gewisse Überschneidungen mit den Klassen der überbauten Fläche ergaben. Von den anderen Klassen trennt sie sich aber sehr gut ab.

Durch die sich an die Klassifikation anschließende Generalisierung sind viele Einzel-Bildelemente der Klasse „vegetationslos“, wie ganze Baustellen und Straßenzüge, ausgefiltert worden. Mit der Filterung sollte versucht werden, den großen Überblick und die Erfassbarkeit zu erleichtern. Daß dabei ein gewisser Informationsverlust zur Original-Klassifikation in Kauf genommen werden mußte, ist verständlich.

Die Trennung der beiden Klassen erfolgte in Kanal 4.

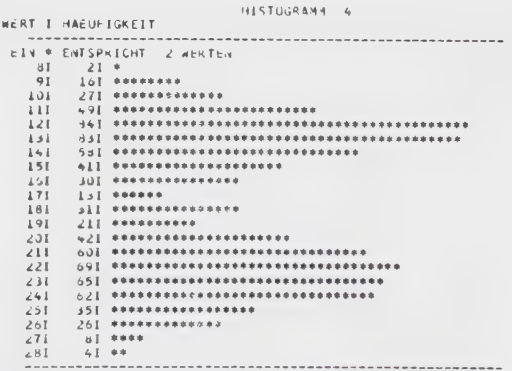
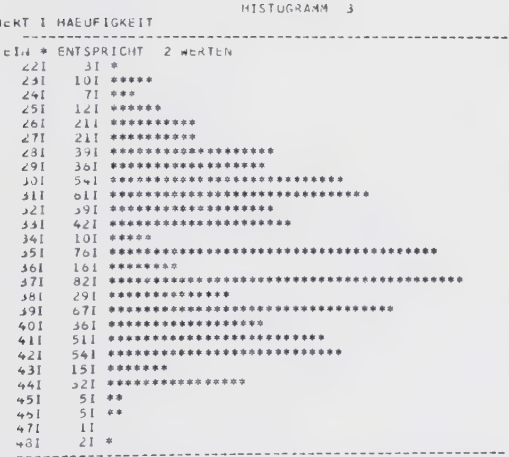
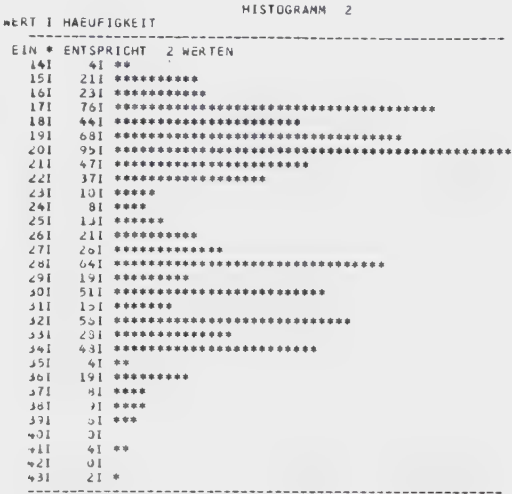
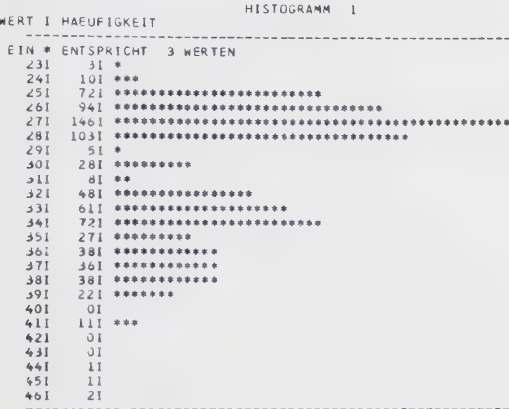


Abb. 34: Histogramme der Klassen „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“ (Hist. 1–4 = Landsat-Kanäle 4–7).

5.4.5 Probleme der Homogenität des Datenmaterials – aufnahmeseitig

Die erste Sichtung des Datenmaterials erfolgte über die Rohdaten- („Bulk“)-Bilder. Die Landsat-Aufnahme vom 7. Oktober 1972 (Abb. 24) zeigt eine fast völlig wolkenfreie Szene. Aus Erfahrung

mit früheren Bildern sowie auch andeutungsweise ersichtlich, scheint es insbesondere in Kanal 6 Streifungsfehler (Banding) zu geben.

Eine weitere Kontrollmöglichkeit ergibt sich direkt über die Bänder. Graustufendrucke, Histogramme sowie Stichprobenstatistiken können

Aufschluß über ein Banding ergeben. Auf diesem Wege konnte in Kanal 6 Streifung als gravierender Einfluss nachgewiesen werden (Abb. 35). Dies

hängt mit dem Aufnahmesystem zusammen, da einer der sechs Detektoren des Kanals 6 eine wesentlich andere Empfindlichkeit aufweist.

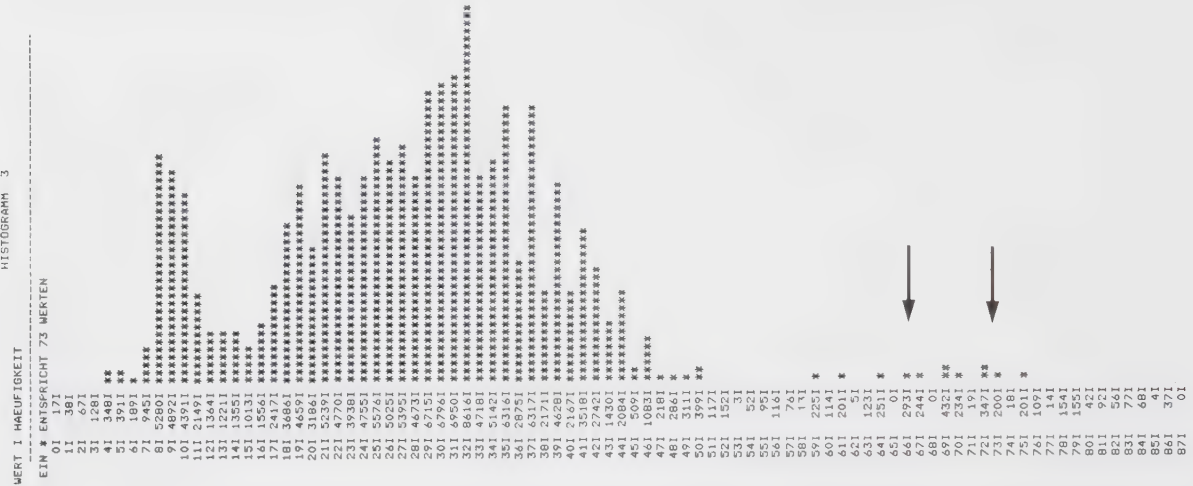


Abb. 35: Histogramm eines Bildausschnittes im Landsat-Kanal 7. Die bimodale Verteilung ist auf den starken Reflexionsunterschied von Wasser (tiefe Werte) und Land im nahen Infrarot zurückzuführen. Eindeutig lassen sich hier die Banding-Fehler nachweisen (s. Pfeile).

5.4.6 Atmosphärische Störungen

Besondere Probleme stellen sich jeweils bei der Frage nach den atmosphärischen Störungen. Bei Lyon (1975) und Stänz (1978) werden Methoden beschrieben, wie atmosphärische Korrekturen bei Landsat-Daten vorgenommen werden können. In unserem Falle, der großräumigen Landnutzungsuntersuchungen, schien es nicht angebracht, die erwähnten Methoden anzuwenden, da sie nur bei kleinräumigen Untersuchungen Erfolg versprechen.

Umgekehrt wurde versucht, über die Stichprobenstatistiken die Streuungen der vom Satelliten

gemessenen Helligkeitswerte in den vorgegebenen Klassen zu untersuchen. Darum wurde auch Wert auf eine gute Verteilung der Stichproben im ganzen Untersuchungsgebiet gelegt.

Die in der Statistik erzeugten Klassenhistogramme, Mittelwerte und Standardabweichungen sind Indizien für unterschiedliche Stichproben an sich, jedoch auch für variierende atmosphärische Störgrößen.

Bei der Betrachtung der Histogramme der Klasse „Nadelwald“ schien sich eine Untergruppierung in zwei unterschiedliche Typen aufzudrängen (Abb. 36).

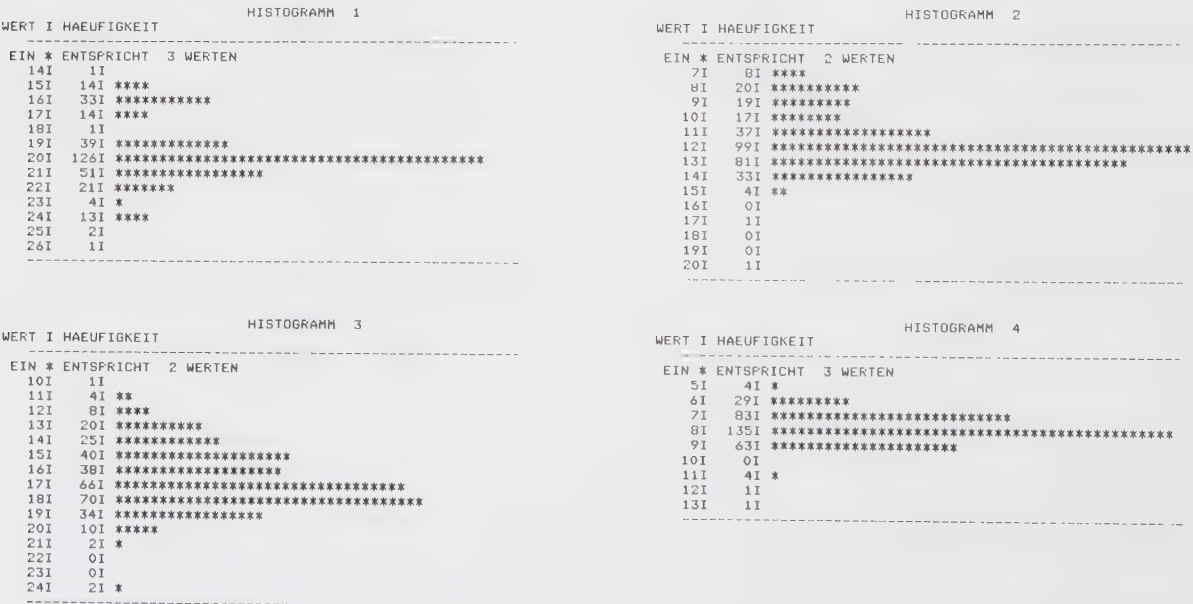


Abb. 36: Histogramme der Klasse „Nadelwald“ (Hist. 1—4 = Landsat-Kanäle 4—7). Die bimodale Verteilung gab zur Vermutung von zwei Unterklassen Anlaß. Ursache sind aber atmosphärische Störungen – eine leichte Dunstschicht überlagerte die Signaturen der tieferliegenden Nadelwälder (s. Abb. 37).

Auffallend war zunächst, daß sich die Typen nur in den Kanälen 4 und 5 unterscheiden ließen. In den Kanälen des sichtbaren Bereichs konnte man deutlich einen dunklen und einen hellen Nadelwald postulieren. Eine großräumige PPD-Klassifikation der Klassen „Nadelwald hell“, „Nadelwald dunkel“, „Laubwald“ gab Aufschluß über das Phänomen. Die Unterklasse „Nadelwald dunkel“ war räumlich begrenzt auf den südöstlichen alpinen Teil des Untersuchungsgebietes, das Hörnlibergland, einige Bergkämme im Mittelland

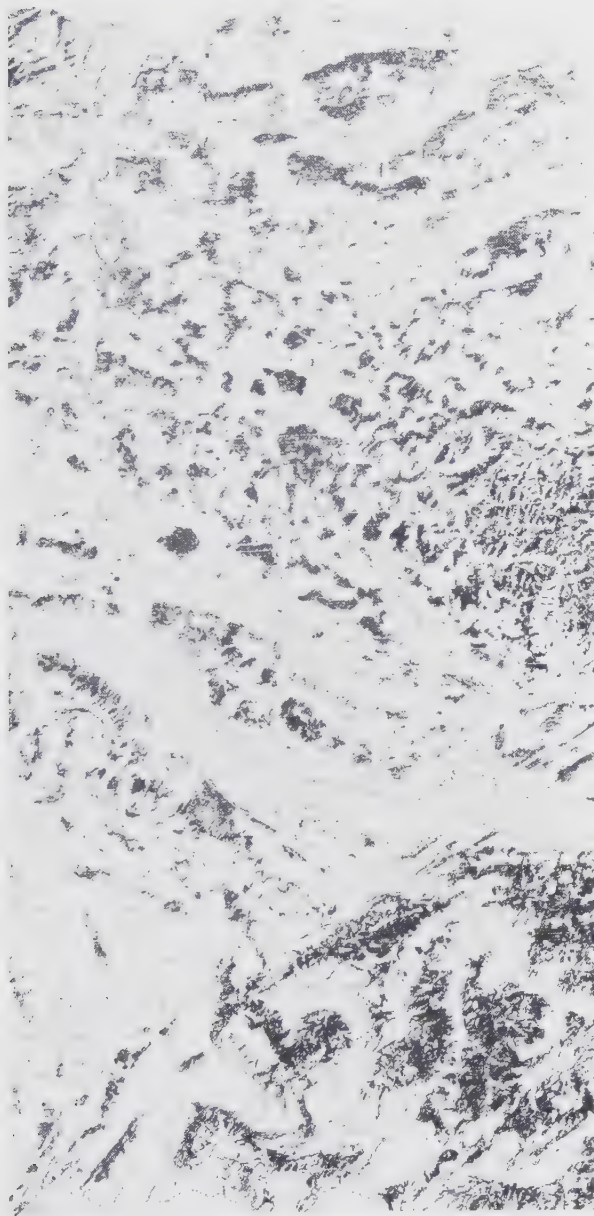


Abb. 37: Landsat-Klassifikation des gesamten Bildausschnittes (Zürichsee-Umrandung in unterer Bildmitte wegen Fehlklassierung des Randes in Nadelwald gut sichtbar). Dargestellt sind Laubwald (hellgrau), tieferliegende, durch Überlagerung mit Dunst-Streulicht hellere Nadelwälder (dunkelgrau) und Nadelwälder über der Dunstschicht (schwarz). Anhand der Klassifikation dieser Signaturdifferenzen lassen sich die Höhen und die Verbreitung der Dunstobergrenze kartieren und bestimmen.

sowie auf die Schwarzwaldhöhen (Abb. 37). Die Korrelation dieser Gruppe mit der Höhenkarte zeigt, daß der Typus „Nadelwald dunkel“ nur über ca. 850 m vorkommt, und daß der Typus „Nadelwald hell“ darüber völlig fehlt. Da eine phänologische Erklärung nicht gegeben werden kann, ist es augenscheinlich, daß es sich hier um ein atmosphärisches Problem handelt. Offenbar führte an jenem wolkenlosen, schönen Tag eine kaum wahrnehmbare Dunstschicht über dem Mittelland mit Obergrenze von ca. 850 m dazu, daß die Objekte „Nadelwald“ durch Überlagerung mit Dunst oder durch Dunstfreiheit trennbare Signaturen aufweisen.

Die Signatur der tiefer liegenden Nadelwälder wurde durch den Streulicht- oder Luftlichtanteil des Dunstes überlagert und aufgehellt, während diejenige des hohen Nadelwaldes weniger verändert „dunkel“ blieb.

Die Überprüfung mit der meteorologischen Situation am Aufnahmedatum ergab in den tieferen Lagen zwar Nebelfreiheit, jedoch sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit (0700 Uhr Einsiedeln 95 %, Engelberg 98 %) und sehr hohe Streuung des Luftlichtes durch das Aerosol. Die höheren Lagen (z. B. Rigi mit 71 % relativer Luftfeuchtigkeit), zeigten durchwegs tiefere Werte.

Zusammenfassend zeigt also das oberflächlich als wolken- und störfrei angenommene Bild erhebliche Einflüsse durch die atmosphärische Schichtung. Am Beispiel der Klassifikation von Nadelwald kann umgekehrt die Dunst/Inversionsobergrenze lokal festgestellt werden.

Die Überlagerung von Dunst-Streulicht über die Meß-Signaturen der tieferen Lagen hat in den Kanälen 4 und 5 einen markanten Kontrastverlust zur Folge. In den Kanälen 6 und 7 läßt sich wegen der relativen Dunstunempfindlichkeit der Wellenlängen im nahen Infrarot das Phänomen nicht feststellen.

Wären im Testgebiet sehr hell reflektierende, genügend große Objekte in tieferen und höheren Lagen vorhanden, so böte sich die Möglichkeit, zusammen mit der Abschwächung des dunklen Targets „Nadelwald“ eine Funktion zur Korrektur der atmosphärisch bedingten Fehler zu ermitteln.

In den behandelten Klassen sowie im Testgebiet fehlen jedoch solche geeigneten Objekte. Schnee als naheliegendes Objekt käme als helles Vergleichsziel nur bei winterlichen Verhältnissen in Frage, muß jedoch auch dann aus technischen Gründen als ungeeignet ausfallen. Die Detektoren des MSS der Landsat-1, -2 und -3 sind zu

empfindlich und übersteuern bei Schnee das System. Erst spezielle Aufnahmesysteme mit nach oben erweiterter Dynamik, die übrigens schon oft und vielerorts gewünscht worden sind, könnten hier eine Lösung bringen. Wiesen und grüne Vegetation als relativ „helle“ Klasse kommt wegen der der Klasse inliegenden internen großen Streuung nicht in Frage.

Bei der Abklärung atmosphärischer Probleme geht es weiter um die Frage, ob z. B. Stichproben einer Klasse im nördlichen Teil des Untersu-

chungsgebietes vergleichbare Mittelwerte und Standardabweichungen aufweisen zu denjenigen der selben Klasse im südlichen Abschnitt. Oder anders gesagt, darum ob der atmosphärische Störeffekt bei gleicher Höhenlage des Testobjektes an verschiedenen Orten im Testgebiet gleich sei!

Die Resultate sind in Abb. 38 zusammengestellt. In allen Kanälen lassen sich auch bei Seen ungefähr gleicher Höhenlage doch erhebliche Intensitätsunterschiede feststellen.

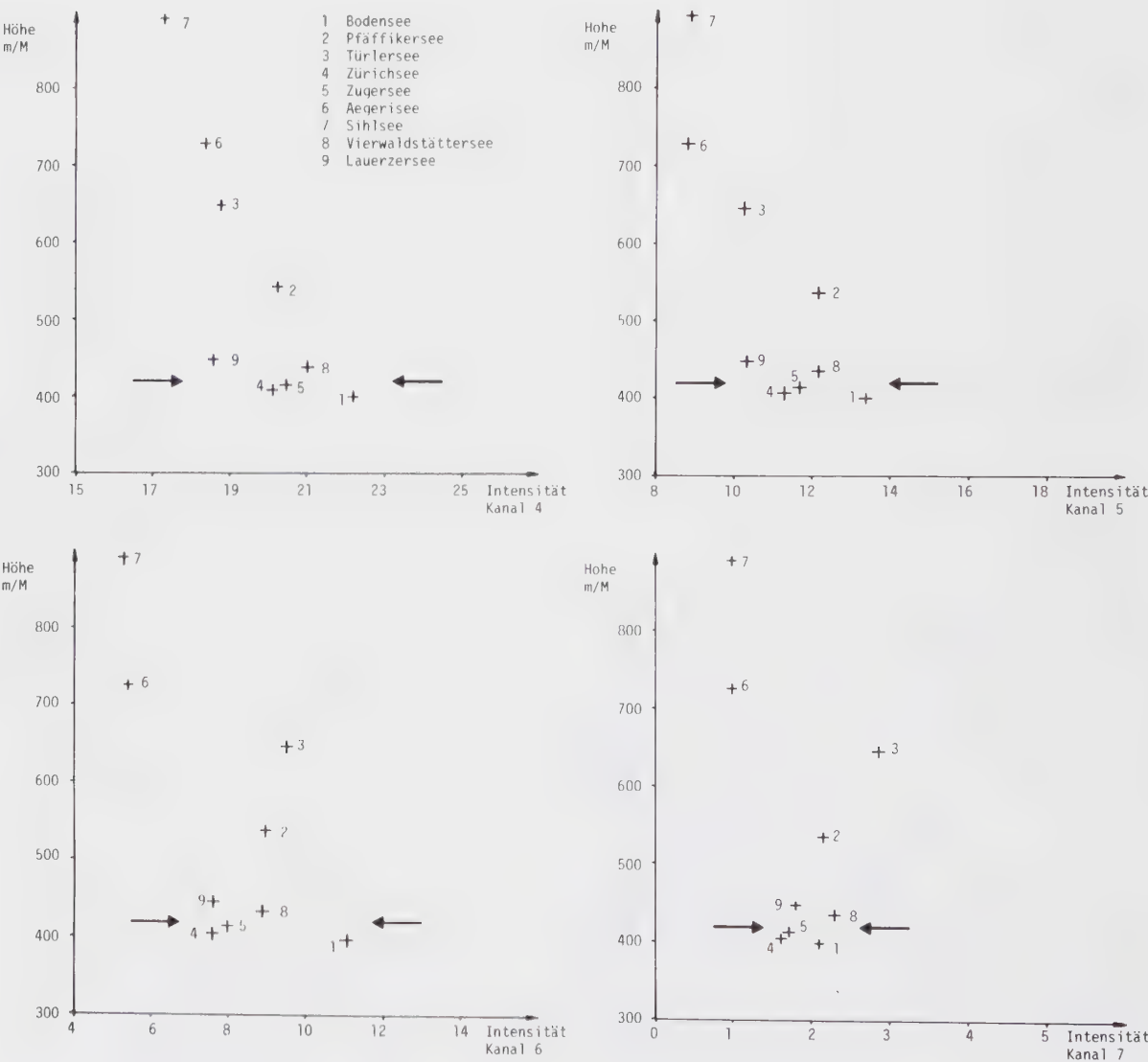


Abb. 38: Darstellung der Intensitätsunterschiede von Wasserflächen innerhalb des Bildausschnittes in den vier Landsat-Kanälen als Funktion ihrer Höhenlage. Durch die breite Streuung der Daten von Seen annähernd gleicher Höhenlage kann nachgewiesen werden, daß die atmosphärischen Störungen lokal sehr unterschiedlich sein können. Darum sollten Korrekturen atmosphärischer Effekte nur relativ kleinräumig durchgeführt werden.

5.5 Einschränkungen der Anwendung von Landsat-Daten¹⁾

Fehlklassierungen können sehr wohl auftreten. Auch multitemporale Arbeitsmethoden können nicht alle Probleme lösen. In unserem Fall war der Signaturkonflikt zwischen überbautem Gebiet und Ried/Sumpfland besonders problematisch.

In den untersuchten Bildern vom 7.10.72, 23.4.76 und 9.6.76 konnte kein signifikanter Signaturunterschied zwischen diesen beiden Kategorien entdeckt werden. Große Hoffnungen wurden daraufhin in den 5. MSS-Kanal im thermalen Infrarot bei Landsat-3 gesetzt. Leider mußte dieser Kanal jedoch kurz nach dem Start des Satelliten wegen technischen Defekten abgeschaltet werden. Momentan besteht die einzige Möglichkeit des Angehens dieses Problems im Verwenden des thermalen Kanals von HCMM (Heat Capacity Mapping Mission). Da dessen Auflösung jedoch bei ca. 500 m liegt, mußte mit einer allgemeinen Auflösungs- und Genauigkeitseinbuße gerechnet werden.

Kritiker könnten uns nun entgegenhalten, daß wir wegen dieser Signaturüberschneidungen sowieso ungesicherte Resultate erzeugen würden und daß darum die ganze Sache nichts taue. Dem kann aber gelassen gegenübergetreten werden, denn wir befinden uns mitten in einer dynamischen Entwicklung. Probleme, die wir heute mit Landsat-1, -2 und -3 haben, werden mit den Folgetypen Landsat-D und -E vermutlich lösbar sein. Andere Probleme tauchen dann sicher erst auf. Es gilt einfach, in der jeweiligen Anwendungsforschung so weit zu gehen, bis ein Schwellenwert der ökonomischen Anwendbarkeit überschritten wird.

Wer hätte 1957 (Start von Sputnik) daran gedacht, daß wir dereinst in der Lage sein werden,

Meßdaten unserer Erde im heutigen Maß und Umfang zu erhalten. Wenn sich die Forschung darauf beschränken würde, Probleme erst dann zu untersuchen, wenn sie nicht mehr kontrollierbar oder nur noch von philosophischem Interesse sind, so müßte sie auf unseren Fall bezogen totales Unvermögen eingestehen.

Darum werden hier auch Resultate gezeigt, die einen Forschungsansatz aufzeigen und nicht unbedingt schon über den kritischen Anwendungsschwellenwert hinüber gelangt sind. Es wäre darum sehr kurzsichtig, die grundsätzlichen Methoden und Möglichkeiten gänzlich in Frage zu stellen.

Andererseits muß davor gewarnt werden, Versprechungen bezüglich der Genauigkeit von erzielten Resultaten abzugeben, ohne diese genau abgeklärt zu haben (s. Abschnitt 5.3.5). Sehr viel ist in der Vergangenheit hier „zerbrochen“ worden.

Es zeigt sich immer wieder, daß zwar statistische Methoden lupenrein sind, daß aber die Natur sich nur schwer in die Statistik hineinprennen läßt. Man spricht immer davon, daß man voraussetze, die statistischen Merkmalsverteilungen seien annähernd Gauss'scher Art.

Ein ganz typisches Beispiel nicht normalen statistischen Verhaltens zeigen die Klassen „dicht“ und „locker überbaut“. Wie sollen dann Klassifikationsverfahren, die auf statistischen Methoden beruhen, hier brauchbare Ergebnisse zeigen?

Nur dann ist die Frage der Brauchbarkeit einer Klassifikation schlüssig beantwortbar, wenn sie mit der Realität verglichen eine akzeptable Annäherung in den gewünschten Kategorien bietet.

Dies abzuklären bedingt zwei Dinge: Einerseits sehr gute Kenntnisse über das zu bearbeitende Gebiet (zumindest über Testflächen in diesem Gebiet) und andererseits gute Kenntnisse der angewendeten Verfahren und Methoden.

1) betr. Landsat-1 bis -3

6 Darstellung der Resultate der Landsat-Landnutzungsklassifikation

Den Aspekten der Darstellung großräumiger Inventuren aus Landsat-Landnutzungsklassifikationen muß besondere Beachtung geschenkt werden. Immer wieder wurde behauptet, daß letztlich ein Resultat, bestehend aus tabellarischen Übersichten, Flächenanteil-Daten sowie Statistiken gewünscht werde. Dies ganz einfach deswegen, weil bisherige Inventuren (z. B. Eidg. Arealstatistik) in jener Form abgefaßt sind.

Die Erfahrung zeigt aber, daß nicht nur der Planer und nach ihm der Politiker ein Instrumentarium besitzen müssen, das es ihnen erlaubt, neben den Statistiken die Resultate in bildhaft klarer Form für ihre Entscheidungsfindung und für Demonstrationzwecke zu verwenden. Nein, es ist geradezu unerlässlich, die räumlich-zeitlichen Aspekte im gesamten Kontext, in bild- oder kartenähnlicher Form, aufzuzeigen.

Hierzu stehen uns mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits ist es denkbar, die Resultate einer Landnutzungserhebung auf eine Basis-karte, z. B. eine Landeskarte, zu übertragen, um eine Kombination von statischen mit dynamischen Elementen zu erreichen. Andererseits liegt es in der rasterförmigen Natur der vorliegenden Daten, sie geometrisch korrigiert, thematisch genau definiert, bildhaft darzustellen. Es kann sich dabei um reine thematische Raster-Strichkarten, um Schwarzweiß-Halbtone- und um Farbdarstellungen oder Kombinationen der erwähnten handeln. Der Verwendungszweck sowie die zur Verfügung stehenden Mittel werden, insbesondere wenn man an einen Druck des Resultats denken muß, die Wahl der Darstellungsart bestimmen. Zu den drei erwähnten Darstellungstypen werden im folgenden Beispiele gezeigt und diskutiert.

Ein Prärequisit dieser Darstellung ist allerdings eine gewisse, durch den Verwendungszweck bestimmte Vorbehandlung der Resultatdaten. Nach einer Klassifikation ist ein Resultat eventuell noch zu vereinfachen oder zu generalisieren; gewisse systematische und unsystematische Fehler müssen zuerst beseitigt werden, ehe der eigentliche Darstellungsprozeß einsetzen kann. Das, was der Kartograph oder Kartenautor in der Kartenherstellung eventuell noch manuell verändert, ausgleicht, zusammenfaßt oder retuschiert, das möchte man möglichst automatisiert dem Prozeß der Klassifikation folgen lassen, um schließlich ein dem Verwendungszweck optimal angepaßtes Resultat erzeugen zu können.

6.1 Automatische Generalisierungs-Prozesse bei klassifizierten Landsat-Bildern¹⁾

Ein Landsat-Pixel umfaßt ein ca. 57×79 m großes Rechteck Bodenfläche. Mit dieser „Bodenauf-
lösung“ ist es klar, daß kleinere Objekte sich nur dann manifestieren können, wenn ihr Kontrast zum Umfeld genügend groß ist.

Lichtenegger (1977) hat gezeigt, daß man schon mit einem gewöhnlichen Spiegel von 50×50 cm Kantenlänge ein ganzes Landsat-Bildelement durch Blendung mit Sonnenlicht überstrahlen kann. In der Natur treten zwar solche Reflexionserscheinungen nicht auf, doch kann sehr wohl eine 20 m breite Straße, wenn ihr Kontrast zur Umgebung groß genug ist, durch Beeinflussung der Pixel-Reflexionswerte erkennbar werden. Praktisch gesehen handelt es sich bei einem solchen Bildelement um ein gemischt zusammengesetztes Pixel – oft scherzhafterweise und doch recht brauchbar im deutschen Sprachgebrauch als „Mixel“ bezeichnet, dessen Meßwert gemischt ist aus den Produkten der Flächenanteile und des Helligkeitswertes der Einzelobjekte.

Denken wir uns nun ein Raster von 57×79 m über die Landschaft gelegt. Da wird es sofort offenkundig, daß es sich bei den wenigsten Pixeln um reine handelt, die nur eine Klasse, einen Bodenbedeckungs- oder Nutzungstyp beinhalten. Dadurch wird es auch hinfällig, gewisse Fragen überhaupt zu stellen.

Beispielsweise hat es keinen Sinn, mit den entsprechenden Daten Agrarstatistiken erstellen zu wollen. Das Aufnahmesystem ist rein auflösungsmäßig dazu nicht geeignet. Auch die Frage, ob es spektral möglich sei, durch die vier gegebenen Bereiche die wichtigsten Anbauprodukte in Westeuropa ausreichend zu trennen, sei noch dahingestellt.

Zurück nun zur Landsat-Szene, die sich in großem Maße aus gemischt zusammengesetzten Bildelementen darbietet. Die Definition und Klassifikation reiner Bildelemente durch statistische Werte und vorgegebene Algorithmen ist kein großes Problem.

Das Herbeiziehen von Misch-Pixeln zu gewissen Klassen verändert deren Statistik so weit, daß es oft zu Überschneidungen von Klassen kommt.

¹⁾ Lit. *Itten & Fasler* (1979)

Auch die Natur bietet uns solche Gemische an. Wie soll beispielsweise ein Bildelement, das zur Hauptsache Wiesland und daneben noch ein paar Nadelbäume beinhaltet, umschrieben und klassiert werden? Verwendet man überwachte Klassifikationsvorgänge auch noch so sorgfältig, so wird es immer wieder Fehlklassierungen geben. In unserem Falle könnte durch die Mischung die Signatur für Laubwald entstehen.

Gerne möchte man auch in einer Klassifikation möglichst keine Überschneidungen und Mischklassen verwenden. Man wird dadurch gezwungen, nach statistischen oder rein empirischen Gesichtspunkten Unterscheidungs- und Trenngrenzen im Eigenschaftsraum festzulegen. Dadurch können Bildelemente mit geringfügigen Unterschieden einmal in jene oder dann in eine andere Klasse eingereiht werden. Das Resultat solcher Vorgänge ist meistens ein stark zergliedertes, unruhiges Bild (Abb. 41), das u. a. gestört wird von zufällig vorkommenden „falsch“ klassierten Bildelementen. Im Englisch wird dafür der Ausdruck „noisy picture“ (von : noise = Rauschen) verwendet.

Es ist sicher in seiner Informationsfülle für den Betrachter schwierig zu fassen. Das Bild kann schlecht geistig perzeptiert (engl. „mental perception“) werden. In der Kartographie geht man durch das Generalisieren gegen störenden Informationsüberfluß vor. Genauso soll hier versucht werden, durch sequentielles Verwenden räumlicher Filter das Bild zu beruhigen. Oft verwendet und in der Literatur (u. a. Davis & Peet 1976, Goodenough & Goldberg 1977) bereits mannigfach beschrieben werden quadratische 3 × 3 oder 5 × 5 bzw. 7 × 7 oder 9 × 9 Filter. In der Bildvorverarbeitung kann man sie zur Bildglättung (engl. „smoothing“) oder Aufsteilung (engl. „sharpening“), zur Kantenerkennung (engl. „edge detection“), Streifenbehebung (engl. „debanding“) usw. verwenden.

In unserem Falle wollte man mit klassenspezifischen Filtern das Klassifikationsbild generalisieren.

Mit „klassenspezifisch“ ist gemeint, daß nicht jede Klasse die gleichen Anforderungen an den Filter stellt und demnach ein spezieller, für jede Klasse angepaßter Filter deren spezifische Überschneidungsprobleme besser löst.

Das einzig Gemeinsame an den Filtern sind ihre Außendimensionen (x y). Durch die klassenweise Gewichtung kann diese Form jedoch abgewandelt werden.

Beispiel für 3 × 3 Filter für zwei Klassen A und B:

Fall 1		Fall 2	
1 1 1 1 1 1 1 1 1	0 1 0 1 1 1 0 1 0	1 1 1 0 1 0 1 1 1	2 2 1 2 4 1 1 1 1
A ₁	B ₁	A ₂	B ₂

0, 1, 4, = Gewichte

In Fall 1 bei A₁ werden sämtliche acht Nachbarn mitbetrachtet, und das mittlere „gefilterte“ Klassenelement der Klasse A wird der häufigsten Klasse A oder B zugeordnet.

Ist bei B₁ das betrachtete zu filternde Element der Klasse B zugehörig, so ändert es seine Klasse nur, wenn im angenäherten Kreis die Mehrzahl der anderen Klasse zugehört. Durch die Gewichtung mit 0 wurden die „Ecken“ ausgeschlossen.

Im Fall 2 wird ein spezieller Filter für die Klasse A verwendet, der die Nachbarschaft auf der gleichen Zeile unterdrücken soll, während für die Klasse B eine starke Gewichtung für den Klassenerhalt und gleichzeitig eine systematische Gewichtung der Zonen Nord, Nordwest und West (im geographischen Sinne) erwirkt wird. Diese beiden Beispiele mögen die Flexibilität und Komplexität des ebenfalls von Fasler (1978) am Geographischen Institut der Universität Zürich entwickelten und im Interaktiven Bild-Interpretationssystem IBIS eingebauten Filterverfahrens demonstrieren.

Aber auch hier gilt, daß der Anwender, der sein Problem kennt und formulieren kann, der seine Testgebiete sorgfältig vergleicht etc., die individuelle Gewichtung der Filter vornehmen und die Resultate beurteilen soll.

6.1.1 Allgemeine Bemerkungen zu Filter-Generalisier-Techniken und ihrer Anwendung

Mit der hier beschriebenen und am praktischen Beispiel erprobten Methode wird man nicht a priori ein „besseres“ oder „genaueres“ Resultat erhalten. Man versucht zwar, systematische und unsystematische „Fehler“ gerichtet zu verbessern und Klassifikationslücken nach Wahrscheinlichkeitsprinzipien zu schließen. Daneben führt man aber bildkosmetische Operationen durch, die

eben nur durch einen Zwang zu gewisser Generalisierung motivierbar sind.

Der Wahrheitsgehalt, der einer Luft- oder Satellitenaufnahme innewohnt, wird ja schon stark reduziert durch eine abstrahierende Klassifikation. Wird diese für den Nutzer schwer interpretierbare Vorlage nun noch im besprochenen Sinne „vereinfacht“ und somit perzeptierbar, so mag dies Grund genug sein, diese Experimente durchzuführen. Allein der Benutzer wird im Lichte der Anforderungen an das Klassifikationsprodukt entscheiden, ob und in welchem Maße solche Methoden nutzbringend anwendbar sind.

6.1.2 Strategie des Filterns

Man wird zuerst versuchen, durch Filterung unsystematische „Fehler“ zu beseitigen. Es kann sich dabei um technische Datenmängel, Ausfälle etc. sowie auch um gestreute Fehlklassifikationen in Überschneidungsbereichen handeln. Hier werden mit bestem Erfolg symmetrische Filter zur Anwendung gelangen.

Es ist aber auch möglich, systematische Fehler, die z. B. in der Natur der Aufnahme liegen, zu korrigieren. Darum ist es wichtig, klassenspezifisch filtern zu können.

Das Beispiel der systematischen Korrektur von Fehlklassifikationen von Waldrandschatten mag dies deutlich machen (s. Abschnitt 5.4.2). Hier werden nun gerichtete, unsymmetrische Filter, die sich klassenweise in ihrer Wirkung komplementieren, eingesetzt.

Ganz allgemein will man neben diesen Fehler-Filterungen das Bild auch generalisieren, d. h. den Informationsüberschuß, der sich beim Verkleinern großmaßstäbiger Klassifikationen ergibt, auf

ein „erträgliches Maß“ reduzieren. Der Grad der Generalisierung kann durch die Größe des verwendeten Arrays sowie auch durch die innere Gewichtungsverteilung im Filter gesteuert werden.

Die verschiedenen Korrekturmöglichkeiten lassen sich nun erzielen durch mehrmaliges Verarbeiten mit „Einzelfiltern“ oder aber, wie im beschriebenen Beispiel, mit sogenannten „kombinierten Klassenfiltern“, in denen alle erwähnten Korrekturfaktoren vereinigt sind und gleichzeitig wirken.

Letztlich hat man es noch durch eine Prioritätssteuerung der einzelnen Klassen in der Hand, kleinere systematische Korrekturen vorzunehmen.

Da ja im Filterfeld nach gewichteten Klassenhäufigkeiten über die Zuordnung des zu filternden Elements entschieden wird, so muß bei unentschiedenen Verteilungen gemäß einer Prioritätsliste zugeordnet werden.

Der praktische Einfluß der Veränderung der Reihenfolge in der Priorität läßt sich bei Beibehaltung der Filter an einem Beispiel in Tab. 4 demonstrieren.

Die Verwendung eines 3 x 3 Filters wird im praktischen Beispiel demonstriert. Die Klassenpriorität entspricht der Rangfolge B in Tab. 4. Ausgangspunkt der Filterung und Generalisierung ist das Klassifikationsresultat (in digital gespeicherter sowie Bildform) und die Erfahrung, die der Bearbeiter während der Verarbeitung und Genauigkeitskontrolle mit dem Material gesammelt hat.

Im folgenden werden die aufgetretenen Probleme und die entsprechenden Filterlösungen klassenweise beschrieben.

Klassen	Rangfolge A	Flächenanteile A in %	Rangfolge B	Flächenanteile B in %
Wasser	1	4,94	3	5,09
dicht überbaut	2	10,09	4	10,14
locker überbaut	3	30,15	5	31,12
Nadelwald	4	9,17	6	8,06
Laubwald	5	17,19	7	16,85
grüne Vegetation	6	19,58	1	21,98
vegetationslos	7	6,98	2	6,46

Tab. 4: Einfluß der Änderung der Prioritäts-Rangfolge auf die Klassen-Flächenanteile.

6.1.3 Beschreibung der Filterelemente und der angewendeten Filter

Klasse Wasser im Raum Zürich

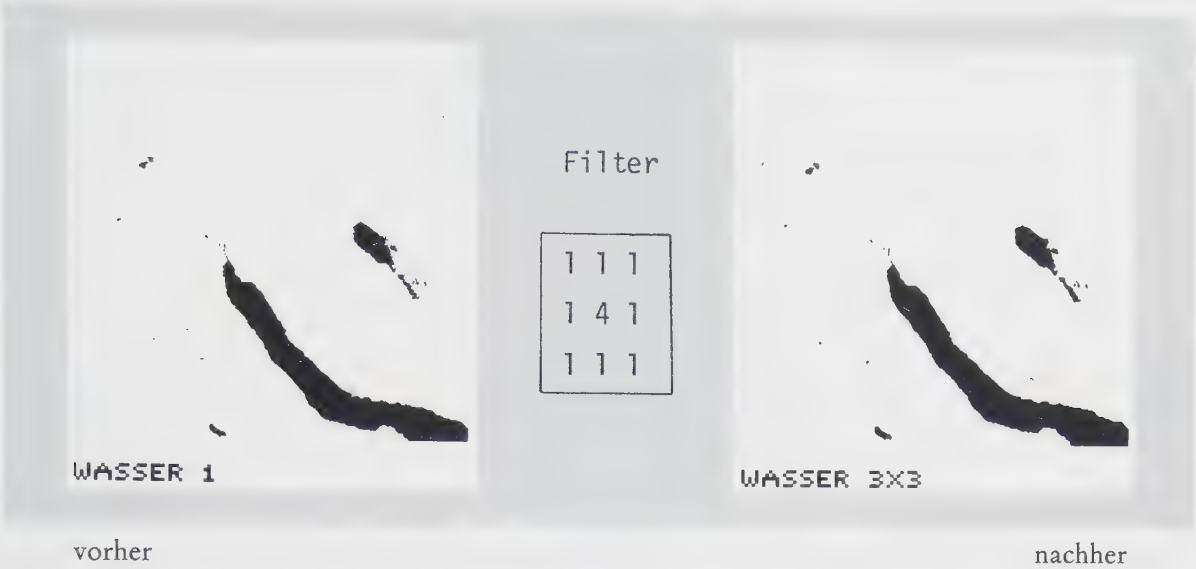


Abb. 39

Beschreibung des Filters „Wasser“

Mit diesem Generalisier-Filter wurde richtungsunabhängig versucht, einzelne „fehlklassierte“ Bildelemente zu eliminieren, wenn sie in einer relativ homogenen Fläche auftraten. Durch die relativ starke Gewichtung des Zentralpixels konnte erreicht werden, daß schmale, lineare Wasserelemente wie z. B. Flüsse, erhalten blieben. Zusätzlich erreichte man durch die absolute Prioritätsstellung, daß der größtmögliche Anteil von zusammenhängenden Wasserelementen erhalten

blieb. Auch bei Generalisierungen größeren Maßstabs (größere Arrays) würde man sicher versuchen, die Klasse Wasser relativ schwach zu verändern, denn Flüsse weisen auch in der Natur durch ihre relativ lineare Struktur meist einen starken Kontrast zur Umgebung auf und bleiben auch bei schlechten Aufnahmeverhältnissen gut sichtbar. Aus dem gleichen Grunde wird an der Seeuferlinie wenig korrigiert. Die flächenprozentuale Veränderung durch die Generalisierung beträgt hier 0,6 % des Totals.

Klasse dicht bebaut im Raum Zürich



Abb. 40

Beschreibung des Filters „dicht bebaut“

Wie im Abschnitt „Probleme mit den Klassen dicht und locker überbaut“ geschildert, sind hier neben einzeln auftretenden Elementen wegen Mischverhältnissen vor allem die nordwestlichen Waldrand-Schattenpartien und die damit verbundenen Fehlklassierungen im dicht und locker überbauten Gebiet zu eliminieren. Dies wird neben einer ganz allgemeinen, recht starken Generalisierung erreicht durch die starke Gewichtung

der Zonen N, NW und W des Filters (im geographischen Sinne). Damit werden Schattenklassierungen nur dann beibehalten, wenn die anschließenden Zonen im N, NW und W ebenfalls der gleichen Klasse angehören, also überbaut sind. Viel häufiger aber finden wir bei uns in jenen weniger bevorzugten Wohnlagen Wies- oder Ackerland, das durch diese starke Gewichtung die Fehlklassierungen ersetzen kann. Durch die verwendete Filterung veränderte sich diese Klasse flächenmäßig um $-0,2\%$ des Totals.

Klasse locker überbaut im Raume Zürich



Abb. 41

Beschreibung des Filters „locker überbaut“

Hier gilt für die Filterstrategie das gleiche wie für die Klasse dicht überbaut, nur in verstärktem Maße. Denn in dieser Klasse treten die erwähnten Einzel- und „Fehl“-Klassierungen viel häufiger auf.

Der entsprechende Flächeneffekt fällt auch

darum mit $-0,6\%$ Veränderung am Total stärker ins Gewicht.

Je nach zentraler Fragestellung bei der thematisch-kartographischen Darstellung würde man bei kleineren Maßstäben den Detailreichtum erhalten (z. B. Besiedlungsdarstellung) oder durch stärkere Filterung bei allgemeinen Landnutzungs-darstellungen die Generalisierung verstärken.



Abb. 42

Beschreibung des Filters „Nadelwald“

Da diese Klasse relativ eng abgegrenzt werden soll, wurde hier ein richtungsunabhängiger, starker Generalisierfilter verwendet, denn von der Natur her bilden z. B. die Nadelforste recht kompakte Gemeinschaften, die durch diese Bearbeitung relativ wenig Veränderung erfahren. Hingegen fallen „Einzelelemente“ innerhalb des Waldes dann meistens zur Klasse „vorwiegend Laubwald“.

Aus einem anderen schwerwiegenden Grunde mußte dieser starke Generalisierfilter gebraucht werden. Durch Mischsignaturen entlang von Seeufern und Flüssen kann in der ursprünglichen Klassifikation sehr oft die Klasse „Nadelwald“ erzeugt werden. Dies zeigt sich sehr gut in Abb. 42 als lineares Band um diese Wasserkörper. Durch die starke Generalisierung konnten diese „Fehler“ ausgemerzt werden, bei allerdings etwas zu starkem Zurückdämmen innerhalb des Waldes. Die prozentuale Flächenveränderung im Untersuchungsraum machte $-0,9\%$ am Total aus.

Klasse Laubwald im Raume Zürich



Abb. 43

Beschreibung des Filters „Laubwald“

Beim Laubwald stellt sich im Hinblick auf die bebaute Fläche folgendes Problem: Der Tendenz nach bilden Südränder von Wäldern, da die Wälder oft auch Hügel überziehen, bevorzugte Wohnlagen. Das Schattenproblem mit Fehlklassierungen stellt sich hier nicht. Dagegen bietet gerade diese Wohnlagen-Bevorzugung eine Fehlerquelle. Diese Lagen werden sehr oft mit Einfamilienhäusern überbaut mit entsprechend geringer

Bauausnutzung und relativ großen Grünflächenanteilen. Die Bepflanzung dieser „Gartensiedlungen“ führt nun gelegentlich, und speziell bei dieser Herbstaufnahme, zu Fehlern (Abschnitt 5.4.3). Um gewichtsmäßig hier einen kleinen Einfluß ausüben zu können sowie als Gegengewicht zur Waldschattenzone, wurde die Südzone leicht bevorzugt und dadurch eine Reduktion der Klasse „vorwiegend Laubwald“ um $-1,6\%$ am Total der Fläche erzielt.

Klasse grüne Vegetation im Raume Zürich



Abb. 44

Beschreibung des Filters „grüne Vegetation“

Im Aufbau sieht dieser Filter ähnlich aus wie derjenige für die Klassen „dicht“ bzw. „locker überbaut“. Der Generalisierfaktor ist etwas abgeschwächt, da diese Klasse schon in der Zuordnung als Sammelklasse bezeichnet worden ist. Durch die Gewichtung der NW-Ecke wird in Waldschattenpartien für einen Erhalt der Klasse gesorgt und eine Zunahme des Waldes unterdrückt. Die Grundhaltung dieser Klasse gegenüber ist folgende: Wird z. B. ein Wald-Bildele-

ment oder eines lockerer Wohnüberbauung zur Klasse „grüne Vegetation“ geschlagen, so ist dieser „Fehler“ weniger schwerwiegend als wenn Gebüsch oder Waldrand oder eine Feldwegkreuzung als „locker überbaut“ klassiert werden. Darum wurde diese Klasse im Flächenanteil nicht unerheblich bei der Generalisierung und „Fehlerbeseitigung“ um $+6,1\%$ des Totals erhöht. Diese starke Erhöhung kann z. T. auch durch die Neuordnung bisher nicht klassierter Elemente erklärt werden.



Abb. 45

Beschreibung des Filters „vegetationslos“

Beim Filter dieser Klasse gilt ähnliches wie bei der Behandlung der anderen Sammelklasse „grüne Vegetation“. Wieder wird versucht, in NW-Waldrandpartien den Klassenerhalt zu unterstützen, während ganz allgemein die Generalisierung hier relativ stark durchgeführt wird. Da in der schweizerischen Landwirtschaft, bedingt durch den Fruchtwechsel, im Oktober überall verstreut gepflügte Äcker anzutreffen sind, und dies in der Landnutzungsklassierung als Streuelement in Erscheinung tritt, wurde versucht, durch die erwähnte starke Generalisierung eine Abstrahierung zu erreichen. Damit treten nur noch Gebiete mit vorwiegend gepflügtem Ackerland sowie Großbaustellen, Kiesgruben etc. in dieser Klasse in Erscheinung. Der Flächenanteil nahm hier leicht um 0,7 % des Totals ab.

Klassen Skew, nicht klassiert und doppelt klassiert

Bei den CCT's des EROS DATA CENTER (Sioux Falls, SD, USA) ist die Bildverschiebung durch Erdrotation während des Aufnahmevergangs, der sogenannte „Skew“, im Gegensatz zu den Telespazio-Bändern, nicht korrigiert.

Durch Umrechnung von Satellitengrundgeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation konnte diese Korrektur durchgeführt werden. Um wieder einen computergerechten, rechteckigen Dataset zu erzeugen, wurden Skew-Füllpixel mit dem Helligkeitswert 255 je nach Verschiebung eingesetzt.

Bei der Klassifikation konnten diese Skewelemente eindeutig getrennt werden, und im anschließenden Glättungsprogramm wurde versucht, die Bildrandzone möglichst zu erhalten. Der Filter wurde entsprechend folgendermaßen gesetzt:

Filter Skew

0	0	0
0	1	0
0	0	0

Der Klassenanteil wurde dennoch leicht erhöht, da die homogenen Skew-Randzonen die individuellen Klassen-Randpixel bei der Filterung oft dominierten. Die dadurch entstandenen Fehler beschränken sich aber jeweils nur auf das erste und letzte Bildelement jeder 971 Elemente langen Zeile und sind somit vernachlässigbar. Zusätzlich wird die ganze erste und die letzte Zeile durch das Glättprogramm beim verwendeten 3×3 Array nicht verändert, da die Filterung erst bei der zweiten Zeile einsetzen kann bzw. bei der zweitletzten aufhört.

Der Flächenanteil des eigentlichen Bildes gegenüber dem ganzen rechteckigen Dataset veränderte sich durch die Skew-Filterung um +0,06 % des Totals.

Mit dem Filter der nicht zugeordneten Klasse wird richtungsunabhängig versucht, eine Auffüllung von „Lücken“ durch Durchschnittswerte zu

erreichen. Die im Array mehrheitlich vorkommende Klasse wird demnach eingesetzt. Gleichzeitig können mit diesem Glättungsfilter Linien, die durch technische Defekte teilweise ausgefal-

len sind, nach dem Wahrscheinlichkeitsprinzip aufgefüllt werden. Hier bringt ein Vorverarbeitungs-Debanding keine Verbesserung, da die Datenausfälle unsystematischer Natur sind (s. Abb. 46).

Klasse „nicht klassifiziert“ im Raume Zürich

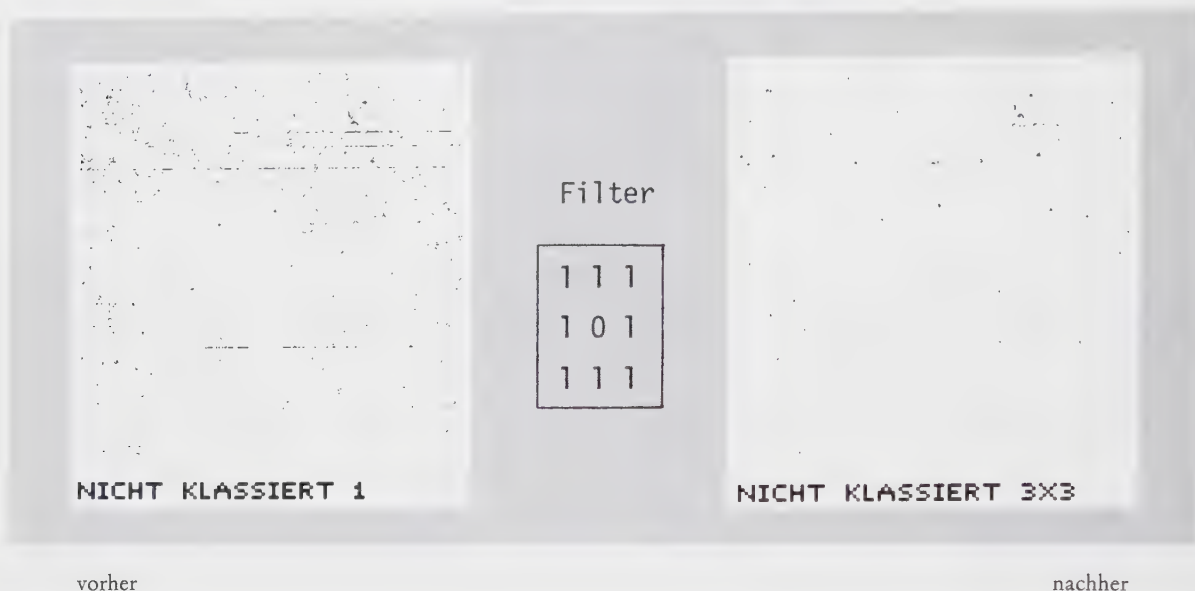


Abb. 46

Bei der Klassifikation nach dem Parallel-Epiped-Prinzip wurde im vorliegenden Falle darauf geachtet, daß es keine Klassenüberschneidungen gab. Deshalb kommen keine doppelt klassierten Bildelemente vor. Das IBIS Glätt-Programm ist jedoch so aufgebaut, daß bei eventuellen Doppelklassierungen diese „Fehler“ behandelt werden können. Der dann z. B. einsetzbare Filter könnte wie folgt ausgebildet werden:

Filter „doppelt klassiert“

1	1	1
1	0	1
1	1	1

Klasse	% vor Filterung	% nach Filterung
1 Wasser	9,7	10,3
2 dicht bebaut	0,8	0,6
3 locker bebaut	8,7	7,3
4 Nadelwald	12,7	11,8
5 Laubwald	15,8	14,2
6 grüne Vegetation	45,6	51,7
7 vegetationslos	3,5	2,8
8 unklassiert	3,2	1,3
Total	100,0	100,0

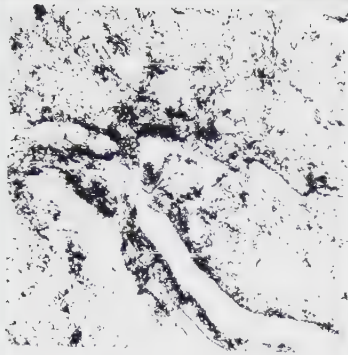
Tab. 5: Veränderung der Klassifikationsstatistik durch die 3 × 3-Filterung

6.1.4 Klassifikationsstatistik

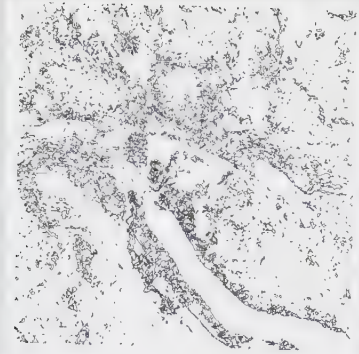
Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Daten zeigen die durch die beschriebene Filterung erzeugten Veränderungen der prozentualen Flächenanteile der einzelnen Klassen für den gesamten Untersuchungsraum.

6.1.5 Der Generalisierungsgrad

Geforderter Maßstab und Verwendungszweck einer Landsat-Landnutzungsklassifikation werden hauptsächlich den Generalisierungsgrad bestimmen. Darüber hinaus müssen jedoch auch die Anforderungen an die Auflösegenauigkeit in jeder Klasse beachtet werden.



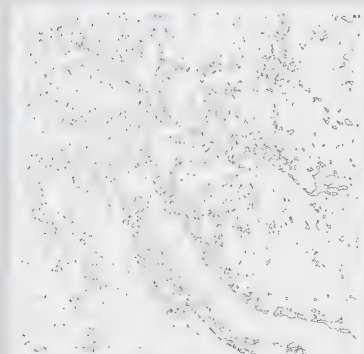
LOCKER BEBAUT 1



LOCKER BEBAUT 1



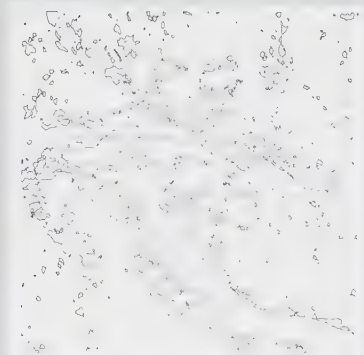
LOCKER BEBAUT 3x3



LOCKER BEBAUT 3x3



LOCKER BEBAUT 5x5



LOCKER BEBAUT 5x5



LOCKER BEBAUT 7x7



LOCKER BEBAUT 7x7

Abb. 47: Original Landsat-Klassifizierung der locker bebauten Flächen im Raum Zürich, deren 3 × 3, 5 × 5 und 7 × 7 Generalisierungen (links) sowie die Äquidensiten zweiter Ordnung als Flächen-Umrandungen.

Wie bereits schon einmal erwähnt, entscheidet die Größe eines Filter-Arrays über den Grad der Generalisierung. Je größer der Filter, desto mehr treten reine Generalisierungs- oder Erhaltungsfragen gegenüber gerichteten Fehlerbeseitigungen in den Vordergrund. Dabei sind die Vorteile einer individuellen, klassenweisen Filterung klar ersichtlich. Denn auch bei größtmöglicher Generalisierung möchte man doch auf gewisse feine Elemente (z. B. Flüsse) nicht verzichten. Dies ist, wie bereits früher demonstriert, durch die innere Gewichtung in den Filtern möglich.

Abb. 47 zeigt anschaulich den Effekt von 3×3 , 5×5 und 7×7 Generalisierfiltern am Beispiel der Klasse „locker überbaut“ im Raume Zürich. Außerdem sind als guter Generalisierungs-Indikator die Umgrenzungen der Klasse dargestellt. Sie wurden als Äquidensiten zweiter Ordnung automatisch mit dem Agfa-Contour Film erzeugt und finden in der Strichkarte, Abb. 50, direkte Verwendung.

Besonders markant ist im Beispiel der Schritt von der unfilterten Klassifikation zum 3×3 -Resultat. Gewisse Details gehen verloren zugunsten einer starken Verbesserung der Übersichtlichkeit. Die weiteren Schritte geben dem Resultat ein immer mehr kartenmäßiges Erscheinungsbild. Dies mag andeuten, daß wir eine starke Generalisierung durch die Karten gewohnt sind. Bei allen in dieser Arbeit im Vergleich mit Karten gezeigten Landsat-Klassifikationen handelt es sich um 3×3 Filterversionen (Ausnahme Abb. 15 und 37 sowie bei den speziellen Filterdemonstrationen). Nicht nur wurden dadurch die Bilder „gesäubert“ von systematischen und unsystematischen Fehlern, sondern sie wurden auch deutlich geistig perzeptierbarer.

Bei der schwarzweißen Gesamtdarstellung in Abb. 49 sowie beim farbigen Klassifikationsresultat (Abb. 51) wurden ebenfalls die 3×3 Ausgangsprodukte verwendet. Hingegen ist bei der speziellen Schwarzweiß-Strichkarte (Abb. 50) die

5×5 -Version gewählt worden, weil dadurch die Flächenumgrenzungen regelmäßiger wurden.

6.2 Praktische Möglichkeiten der bildhaften Gesamtdarstellung der Klassifikationsresultate

Auf die schrittweise Verarbeitung der Bilddaten folgen verschiedene Möglichkeiten der Resultatdarstellung (Abb. 48).

Die drei hauptsächlichen Möglichkeiten der Schwarzweiß-Halbton-, der Strich- und der Farbdarstellung werden in den folgenden Abschnitten dargestellt und kurz erläutert.

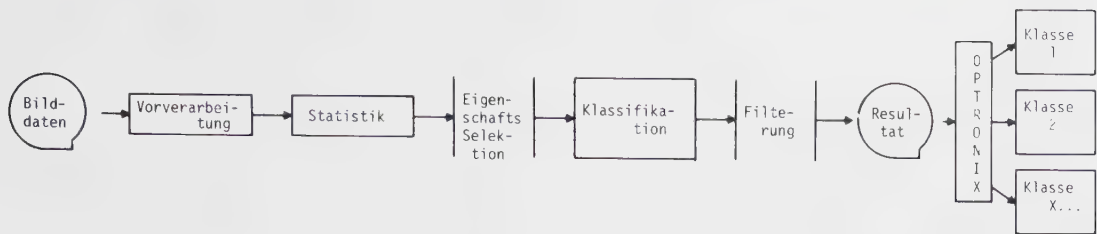
Sicher sind Farbresultate in jeder Hinsicht in ihrer Wertung am effektivsten. Es läßt sich so auch weit mehr Information darstellen als in Schwarz-weiß-Produkten. Ein Hauptargument gegen Farbresultate sind deren Kosten.

Günstiger dagegen sind Schwarzweiß-Graustufen-(Halbton-)Darstellungen, deren Vorlagen (Negative) z. B. am Optronics Photomation System direkt erzeugt werden können. Die Limitation ist hier sicher das physiologische Problem, daß man nur eine sehr kleine Anzahl von Klassen aufgrund einer Grauwerteskala eindeutig zuordnen kann. Beim Halbtondruck entstehen, allerdings geringere, Rasterungs- und Kostenprobleme.

Eine Zwischenlösung bietet sich im Verwenden von Raster/Strichdarstellungen an. Durch geschickte Auswahl der Raster kann eine große Anzahl von Klassen dargestellt und zugeordnet werden. So bietet beispielsweise das Eidg. Statistische Amt für den Ausdruck von Flächennutzungsdaten aus dem ORL-Informationsraster 220 verschiedene Raster an.

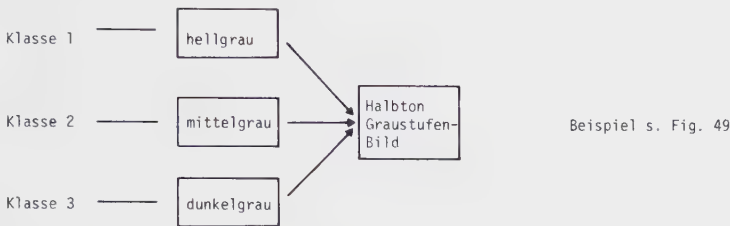
Hinzu kommt der problemlose Druck von gerasterten Strichkarten. Allerdings müssen der stark erhöhte Vorverarbeitungs-Aufwand sorgfältig in Rechnung gebracht und die weniger große perzeptive Eignung gegenüber der Farbdarstellung abgewogen werden.

1. Schritt: Klassifikation und Bild-Darstellung der einzelnengefilterten Klassen via Optronics Photomation

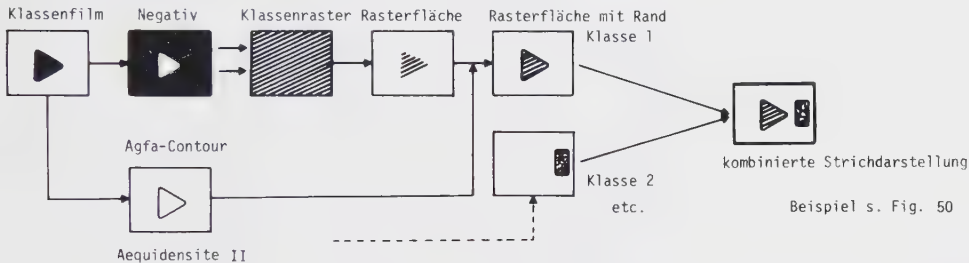


2. Schritt: Aufbereitung des Bildmaterials zu einer Gesamtdarstellung. Es bestehen 3 Möglichkeiten: schwarz-weiss Halbton, schwarz-weiss Strich und farbig

a) Schwarz-weiss Halbtondarstellung über Kombination von Einzelklassenfilmen oder direkt kombiniert aufbelichtetes Bild, das die Klassen in verschiedenen Grautönen darstellt



b) Schwarz-weiss Strichdarstellung über Maskierung, Rasterung und Agfa-Contour Kantendarstellung, und anschließende Mehrfachbelichtung auf schwarz-weiss Material.



c) Erzeugung 3-er Farbauszugsfilme "yellow" "magenta" und "cyan" am Optronics Photomation, und anschließende Belichtung auf Farbmaterail.

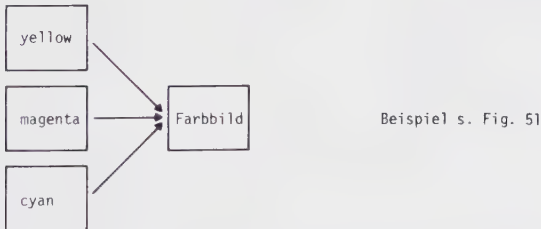


Abb. 48: Übersicht über den durchgeführten digitalen Bildanalysen-Prozeß und die daran anschließenden Möglichkeiten der bildhaften Gesamtdarstellung der Klassifikationsresultate.

6.2.1 Schwarzweiß-Halbton-Darstellung

Mit dieser Art der Darstellung ist der Leser in der vorliegenden Arbeit bereits vertraut. Bildet sie doch die logische und schnellste Lösung der direkten Erzeugung von Resultaten ausgehend von den Resultatdaten auf Band über das Photomation System auf einen Film. Im Beispiel (Abb. 49) wurde bewußt darauf verzichtet, alle Klassen durch unterschiedliche Grauwerte darzustellen, da es außerordentlich schwierig ist, mehr als fünf Grauklassen eindeutig zuzuordnen. Dargestellt finden wir darum die Klassen Wasser, dicht- und

locker überbaut, Nadelwald und Laubwald. Die Klassen grüne Vegetation und vegetationslos wurden weiß belassen. Die photographische Weiterverarbeitung dieser Optronics-Filme ist billig und technisch unproblematisch. Es lohnt sich daher, neben den Klassen-Einzelfilmen verschiedene Kombinationen von Klassen auf Film zu erstellen. Damit können Passerprobleme vermieden werden.

Bei der Festlegung der Grauwerte ist der Transfercharakteristik und Physiologie des menschlichen Auges Rechnung zu tragen.

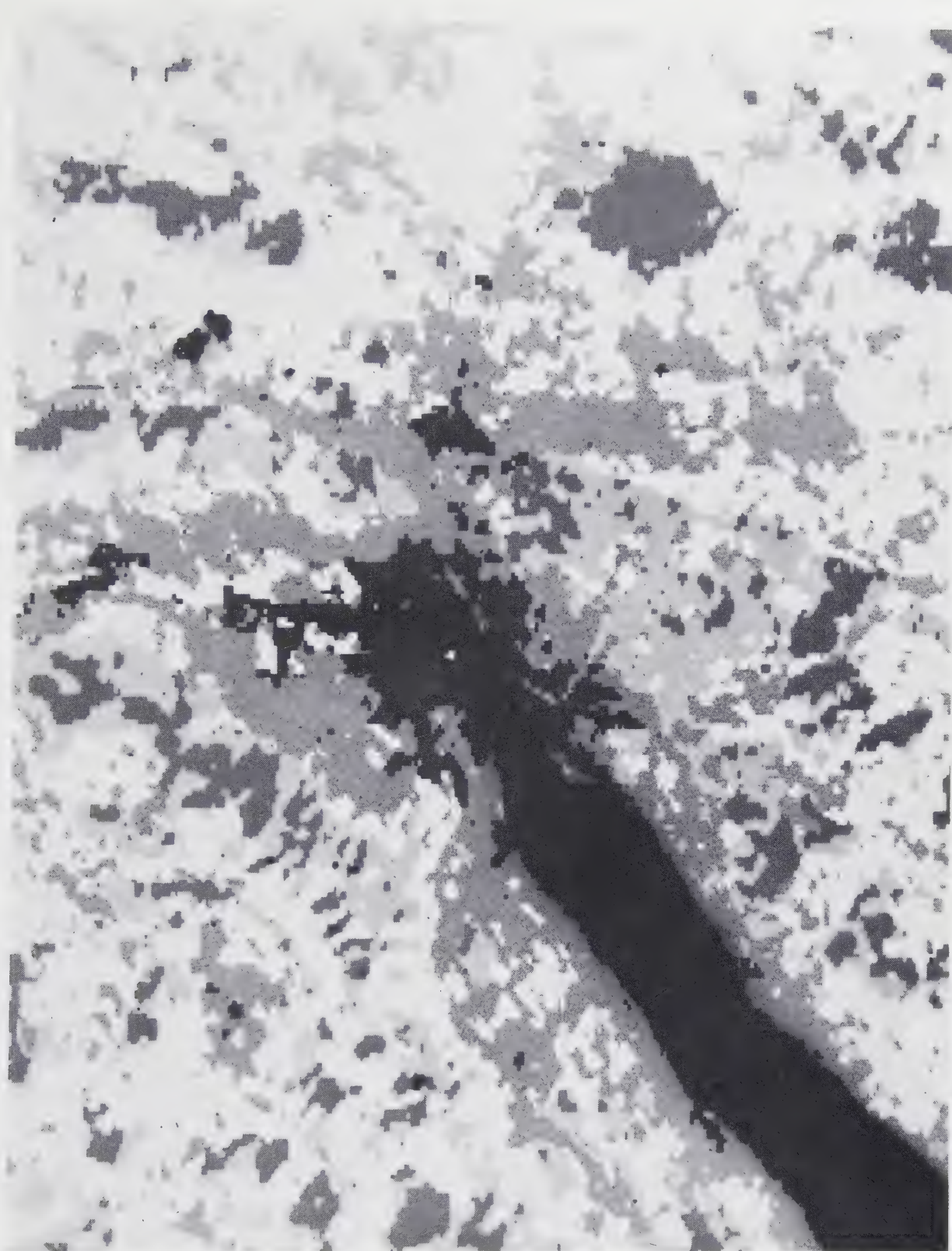


Abb. 49: Photographische Graustufen-Darstellung der Landsat-Landnutzungs-klassifikation des Bildes E-1076-09440 vom 7. 10. 1972; 3 × 3-gefilterte Version im Maßstab 1 : 100 000, Raum Zürich.

6.2.2 Schwarzweiße Raster/Strich-Darstellung

Wird in einer Aufgabenstellung verlangt, daß sehr viele Klassen unterschieden und zur Darstellung gebracht werden sollen, so bietet sich mit der folgend beschriebenen Raster/Strichmethode eine Lösung an, die genügend Unterscheidungsmerkmale bietet und daneben im Druck sehr viel billiger ist als eine Farbdarstellung. Dies muß erkauft werden durch größeren labortechnischen Aufwand. Die Methode ist aber sehr einfach und in allen Stufen gut kontrollierbar.

Ausgehend von den auf Film aufbelichteten Einzelklassen werden von diesen zuerst Negative gezogen und über das Agfa-Contour-Verfahren vom Positiv oder Negativ Äquidensiten zweiter Ordnung erstellt (Klassenfilm kann bereits als Äquidensite erster Ordnung bezeichnet werden, da die Klassenflächen einen uniformen Grauton haben). Durch dieses Umkopieren auf Agfa-Contour-Material erhalten wir die Umrandungslinien der Flächen. Dieser Prozeß ist im Gegensatz zur sonstigen Anwendung des Agfa-Contour-Verfahrens unkritisch, da zur Kantenabbildung ein großer Belichtungsspielraum zur Verfügung steht. Durch die Variierung der Gelbfilterdichte kann man die „Strichdicke“ der Linie verändern. In unserem Beispiel, das als Experimental-Produkt angesehen werden muß, wurden alle Klassenlinien mit gleichen Gelbfilterdichten abgebildet.

Verwendet man nur die Negative und kopiert die Klassenflächen einzeln je durch ein vorgewähltes Raster (Beispiel Klasse Wasser durch ein Wellenraster etc.), so entstehen aufgerasterte, umrandungslose Flächendarstellungen der Einzelklassen. Kopiert man in einem zweiten Schritt die Agfa-Contour-Äquidensiten (Klassen-Umrandungslinien) hinzu, so werden die Flächen durch die Linien sehr gut gegeneinander abgegrenzt. Da beim Aufeinandertreffen zweier Klassen demnach auch zwei Begrenzungslinien aneinander stoßen, kann auf verschiedene Begrenzungslinien systematisch verzichtet, oder gewisse kritische Stellen müssen retuschiert werden.

Das paßgenaue Übereinanderkopieren, das am besten schrittweise erfolgt, stellt natürlich Probleme. Aber ohne diesen gewissen Aufwand kann man die Vorteile einer sehr flexiblen Raster- oder Signaturenkarte nicht erkaufen. Wie eben angedeutet, können statt Raster auch beliebige Signaturen erstellt und in die Klassenflächen kopiert werden. Je nach Maßstab und Detailerkennung wird man eine Wahl vornehmen.

In unserem Falle wurde das Landsat-Klassifikationsresultat zuerst mit einem 5×5 Generalisierfilter behandelt, der verhinderte, daß allzu kleine Flächen den graphischen Eindruck störten, und daß allgemein der Verlauf der Umgrenzungslinien geglättet wurde.

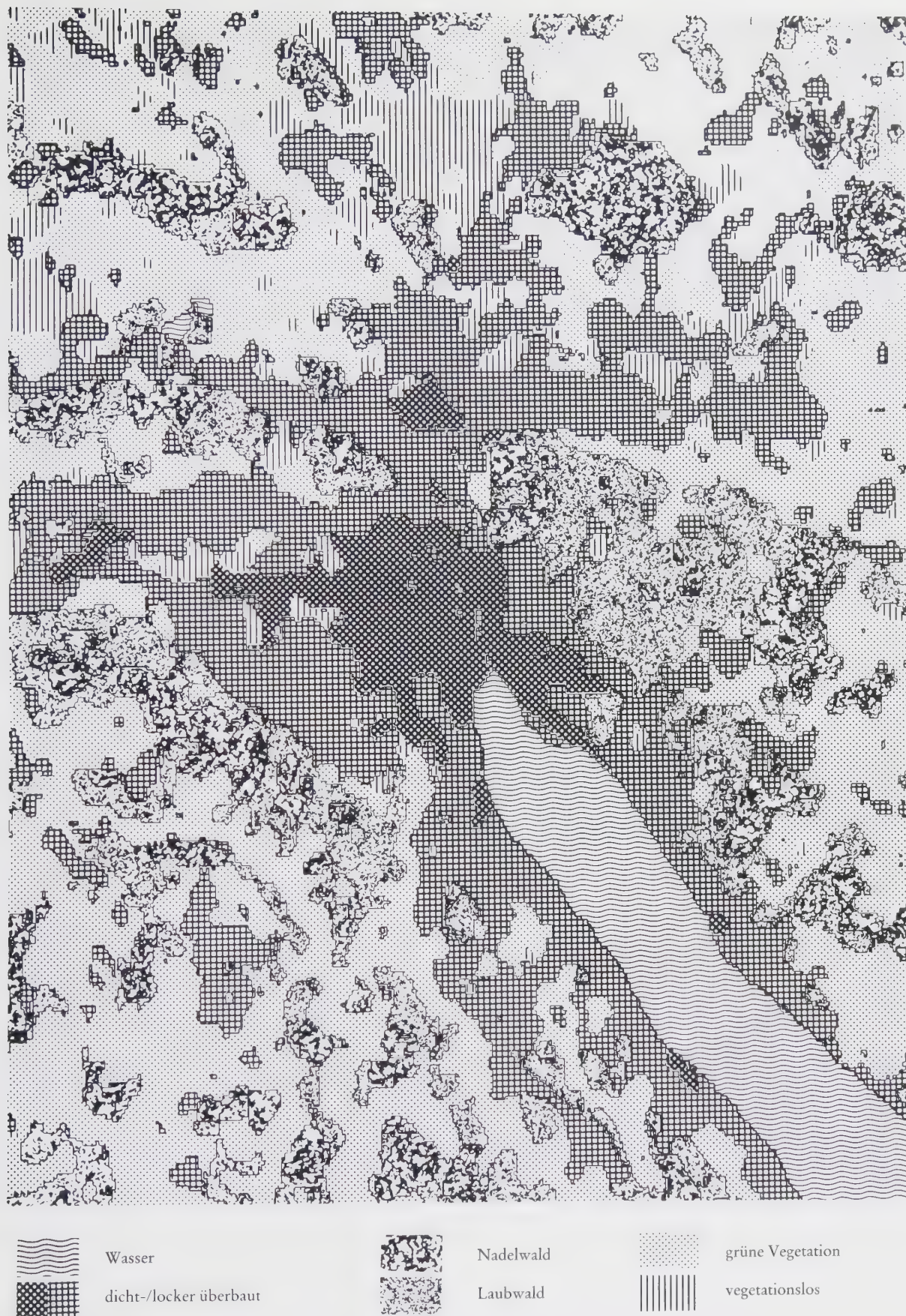


Abb. 50: Experimental-Darstellung der Landsat-Landnutzungs-klassifikation nach Raster/Strichmethode, basierend auf der Kombination von klassenweisen Flächenrastern und Umrandungslinien; Bild E-1076-09440 vom 7. 10. 1972, 5 x 5 gefilterte Version im Maßstab 1 : 100 000, Raum Zürich.

6.2.3 Farbige Darstellung

Relativ einfach gestaltet sich die Erläuterung dieser Methode, deren Vor- und Nachteile. Da das menschliche Auge sehr empfindsam kleinste Farbnuancen unterscheiden kann, ist es möglich, sehr viele Klassen durch Farbunterschiede abzubilden und zuzuordnen. Nicht nur ästhetisch wirkt die farbige Klassifikationsdarstellung in Abb. 51 eindrucklich, sie ist auch von allen beschriebenen Methoden diejenige mit dem besten perzeptiven Wirkungsgrad. Nachteilig wirken sich die gegenüber Schwarzweiß-Darstellungen erhöhten Kosten für Erstellung und Druck des farbigen Resultats aus. Je nach Verwendungszweck ist dieser Aufwand aber notwendig und dann gerechtfertigt, wenn dadurch ein bestimmtes Ziel besser erreicht werden kann.

Hergestellt wurde das vorliegende farbige Landnutzungsklassifikations-Resultat nach dem in Abb. 48 gezeigten Schema.

Mit dem Aufbelichtungsgerät werden direkt die drei Auszugsfilme „yellow“, „magenta“ und „cyan“ erstellt, wenn später das Produkt photo-

graphisch kombiniert werden soll. Geht es um die Erstellung von Vorlagen für Druckplatten, so können direkt die Gelb-Rot-Blau-Auszüge abgebildet werden.

In unserem Falle wurde nach der zweiten Methode aufbelichtet und zu Kontrollzwecken von den Rot-Blau-Gelb-Auszügen farbige Diazos erstellt und zum Farbbild kombiniert. Denn es ist für den Nicht-Fachmann einfacher, mit additiven Farbmischverfahren zu operieren. Auch einer bestimmten gewünschten Farbmischung zugrunde liegende Basiskomponenten konnten in Druck-Tabellen nachgeschlagen werden.

Die Grundlage zur Erstellung reproduzierbarer farbiger Auszugsfilme bildet eine strenge Normierung und Kontrolle aller optisch-mechanischen und photographischen Prozesse. Das speziell ausgebaute Optronics-System und die Zusatzanlagen am Photographischen Institut der ETH Zürich boten in dieser Beziehung die gewünschten Voraussetzungen.

In der vorliegenden Darstellung wurde versucht, mit Ausnahme der Klassen „dicht-“ und „locker überbaut“, möglichst naturähnliche Farben zu verwenden.

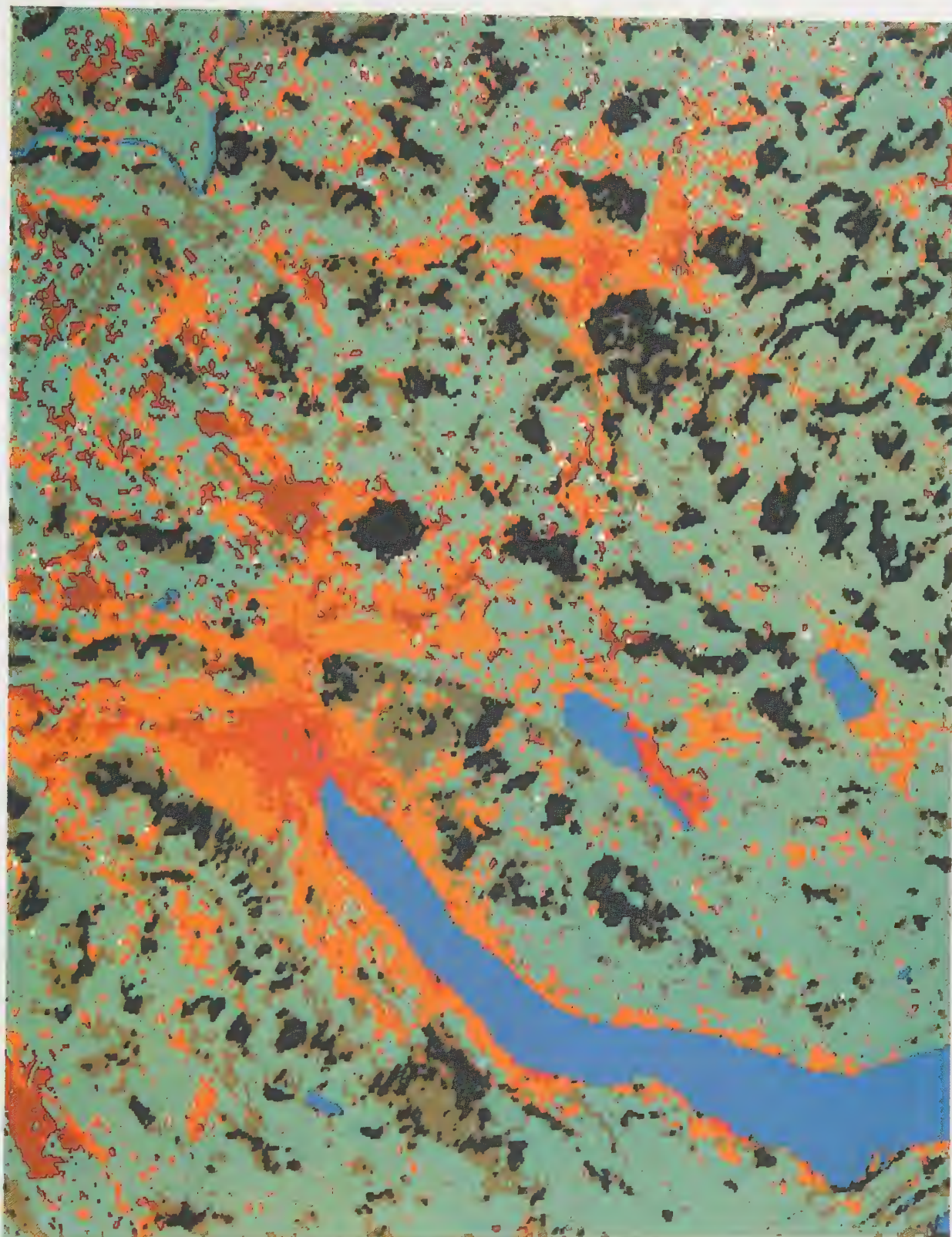


Abb. 51: Farbige Darstellung der Landsat-Landnutzungs-klassifikation des Bildes E-1076-09440 vom 7. 10. 1972. 3 × 3 gefilterte Version im Maßstab 1 : 200 000, Raum Zürich.

blau = Wasser, rot = dicht überbaut, orange = locker überbaut, dunkelgrün = Nadelwald
 olivgrün = Laubwald, hellgrün = grüne Vegetation, braun = vegetationslos, weiß = nicht klassiert

7 Wertung der durchgeführten Untersuchungen

Es soll hier der Versuch unternommen werden, die vorliegende Arbeit zu überblicken und kritisch zu werten.

Ausgangspunkt war das Ziel der „Objektivierung der operationellen Möglichkeiten der Anwendung von Landsat-Erderkundungs Satellitendaten in unserem Raum, unter dem Aspekt unserer speziellen, landeseigenen Probleme“. Es sollte der Stand der Möglichkeiten zum Zeitpunkt Ende 1978 aufgezeigt und auf weitere mögliche Anwendungen hingewiesen werden.

Nach einer gewissen zu optimistischen Einstellung gegenüber den Bildern der frühen 70er Jahre ist der Autor heute nicht nur kritischer, sondern auch an Erfahrung durch Arbeiten im In- und Ausland reicher und somit in der Lage, die heutigen Möglichkeiten sowie das Potential der näheren Zukunft realistischer zu überblicken.

Im Kapitel „Grundlagen der Bildanalyse“ werden keine neuen Erkenntnisse vermittelt. Es sollte eine solide Basis geschaffen werden in der Analyse von Fernerkundungsdaten, die es später ermöglichte, auf Bestehendem aufzubauen. In den Folgerungen sagt der Autor: „Das Studium des Problems, zuerst theoretisch, dann als Laboranalyse, als Feldversuch, als in situ ‚ground truth‘ während der Anwendung der Methoden der Fernerkundung, und anschließende optimale Analyse des Materials, kann in vielen Fällen, in ökonomisch vertretbarem Rahmen, zu brauchbaren Resultaten und Lösungen führen.“

Die Bearbeitung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten basiert vor allem auf Arbeiten, die am Geographischen Institut der Universität Zürich und in Zusammenarbeit mit anderen Hochschulinstituten durchgeführt worden sind sowie auf eigenen Versuchen. Aus der Fülle von interessanten Anwendungen in anderen Ländern bleibt bei uns eine relativ geringe Anzahl zur sinnvollen Erarbeitung. Das will aber nicht heißen, daß, wenn ein Planer die Satellitendaten heute noch nicht benutzt, er sie nie benutzen wird. Wenn sich die Eidg. Arealstatistik heute mit Grund noch stark auf das Luftbild als primäre Datenquelle stützt, so wird das sicher nicht immer so bleiben.

Anhand einer praktischen Landnutzungsklassifikation, deren Teilresultate schon im Kapitel der

möglichen Anwendungen gezeigt worden sind, wird klar aufgedeckt, mit welchen Problemen momentan in solchen Untersuchungen zu kämpfen ist. In der Kenntnis dieser kritischen Punkte kann den Resultaten bereits heute viel abgewonnen werden.

Hier werden zum Teil auch neue Methoden der Erkennung atmosphärischer Effekte beschrieben und erklärt.

Allgemein wird verzichtet auf detaillierte Genauigkeitsuntersuchungen und Kostenrechnungen. Solche Tests im Rahmen einer derartigen Untersuchung haben singulären und daher zweifelhaften Wert. Es wird aber dringend empfohlen, diese Arbeiten im Kollektiv durchzuführen. Zu denken wäre an ein Verifikationsprojekt im Rahmen der methodischen Untersuchungen für eine neue Arealstatistik oder auch an Forstinventar.

Kritiker haben es heute noch zu leicht, die Methoden und Resultate anzuzweifeln. Viel schwieriger ist es zu beweisen, wieso gewisse Probleme lösbar und andere unlösbar sind. Wir stehen mitten in einer dynamischen Entwicklung. Probleme, die wir heute mit Landsat-1, -2 und -3 haben, werden mit Landsat-D zum Teil lösbar sein. Allerdings werden dann andere auftauchen. Es gilt, wie früher einmal betont wurde, in der jeweiligen Anwendungsforschung so weit zu gehen, bis ein Schwellenwert der ökonomischen Anwendbarkeit überschritten ist.“

Neuland beschreitet der Autor zum Teil dort, wo es um die Darstellung von Resultaten geht. Die von ihm in Zusammenarbeit mit *Fasler* entwickelte Methode der räumlichen Filterung von Landnutzungs-Klassifikationsresultaten ist in ihrem Konzept und dessen Anwendung neu. Es ist abzusehen, daß dadurch neben dem eigenen auch anderen Fachbereichen insbesondere der Kartographie erweiterte Möglichkeiten eröffnet werden.

Im Kapitel der praktischen Darstellungsarten wird mit der vorgestellten Raster/Strich-Methode ein neuer Weg gezeigt, über halbautomatische photographische Verfahren das Problem ökonomisch zu lösen. Das Produkt ist als Experiment zu sehen, das wert scheint, weiter entwickelt zu werden.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, Hinweise zu geben, in welchen Teilbereichen und mit welchen Techniken bei uns gewisse Aspekte der großräumigen Inventarisierung bearbeitet werden können. Nach einer allgemeinen Einführung in die Themen Erd-erkundungssatelliten sowie -systeme und einer Vorstellung von Landsat und seinen Multispektralbildern wird das Thema Bildanalyse systematisch dargestellt.

Aus der Beurteilung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten von Landsat-Klassifizierungen in der Schweiz treten vor allem die Schneekartierungen und deren modellhafte Verknüpfung mit Abflußprognosen in den Vordergrund. Durch das Auflösungsvermögen eingeschränkt, ist es nicht sinnvoll, unter unseren Agrarverhältnissen detaillierte Anbau-Untersuchungen führen zu wollen. Im forstlichen Anwendungsbereich sind großräumige Klassierungen in Nadelwald und Laubwald durchführbar. Für die Erfassung der überbauten Gebiete sind interessante Ansätze gezeigt, obwohl systematische Fehlklassierungen hier vorderhand noch einige Probleme stellen. Besonders aber in randstädtischen Zonen kann der dynamische Aspekt durch die zunehmende Über-

bauung zu sehr sinnvollen Anwendungen führen. Ganz allgemein kann die Kartographie durch diese, in kurzen Zeitabständen periodisch neu zur Verfügung stehenden Datensätze profitieren.

Am praktischen Beispiel einer digitalen Landnutzungsklassifikation in die Klassen „Wasser“, „dicht überbaut“, „locker überbaut“, „Nadelwald“, „Laubwald“, „grüne Vegetation“ und „vegetationslos“ werden das Vorgehen und die Probleme im Detail diskutiert und die Einschränkungen in der gegenwärtigen Anwendbarkeit von Landsat-Daten aufgezeigt.

Zur Aufbereitung und Anpassung von Klassifikationsresultaten an die Bedürfnisse des Benutzers werden neue Methoden der räumlichen Filterung zur Fehlerbeseitigung und Generalisierung erklärt und demonstriert.

Im Kapitel über praktische Darstellungsmöglichkeiten von Landnutzungsergebnissen wird neben Halbton- und Farbprodukten eine neuartige Raster/Strichtechnik gezeigt, und die Arbeit wird abgerundet durch den Versuch einer kritischen Wertung der Untersuchungen.

English Summary

It is tried to discuss and demonstrate how certain aspects of large area inventoring in our latitudes can be approached. After a general introduction into earth resources satellite systems and a presentation of Landsat and its multispectral scanner, the theory of image analysis is systematically developed.

Among practical applications of Landsat classifications, large area snow mapping for runoff modelling is being emphasized. Given the Landsat resolution and our general rural landuse pattern, it seems not appropriate to use MSS data for detailed large area crop mapping. In forestry, however, a distinction between coniferous and deciduous forest is quite feasible. Monitoring of built-up areas shows some prospect despite systematic error classifications due to signature overlaps. Especially in the urban-rural fringe where the most dynamic landuse changes take place, the satellite

derived information represents a viable result. Therefore it is believed that cartography is going to be greatly influenced by easily available image data sets.

In an example of a digital landuse classification into the classes „water, high density built-up, residential built-up, coniferous forest, deciduous forest, green vegetation, and bare soil“ the approach and the encountered problems are carefully discussed, and limits set in regard to today's feasible applicability.

Newly developed specifically user adapted spatial result filtering techniques are introduced and demonstrated. Special emphasis is given to the presentation of a classification result. A new map type in screen/line technique is developed and leads to a critical overall assessment of the conducted research

Literaturverzeichnis

- Binzegger R. P.*: ERTS-Multispektraldaten als Informationsquelle für thematische Kartierungen. Diss. Universität Zürich, 130. S., Zürich 1975.
- Carter P. & Jackson M. J.*: The Elimination Approach to Monitoring Urban Growth from Landsat Data. Paper 13th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 9 S., Ann Arbor 1979.
- Chang A. T. C. et al.*: Studies of Snowpack Properties by Passive Microwave Radiometry. NASA Techn. Memorandum 79671, NASA/GSFC, 15 S., Greenbelt MD 1978.
- Christenson J. W. et al.*: Landsat Urban Area Delineation. In: In: Lab Project 75-3, 38 S., Washington D. C. 1977.
- Craig T. et al.*: Spatial Land-Use Inventory, Modeling and Projection — Denver Metropolitan Area, with Inputs from Existing Maps, Airphotos, and Landsat Imagery. NASA Techn. Memorandum 79710, NASA/GSFC, 210 S., Greenbelt MD 1978.
- Davis W. A. & Peet F. G.*: The Identification and Reclassification of Small Regions on Digital Thematic Maps. Forest Management Institute, Inform. Report FMR-X-90, 40 S., Ottawa 1976.
- Eidg. Statistisches Amt.*: Arealstatistik der Schweiz. Stat. Quellenwerke der Schweiz, Heft 488, 121 S., Bern 1972.
- ESA*: European Remote Sensing Space Programme. Mission Objectives and Measurement Requirements. ESA/EXEC(77)3, 42 S., Paris 1977.
- ESRO*: Multispectral Scanning Systems and Their Potential Application to Earth Resources Surveys. ESTEC Contract Nr. 1673/72, 202 S., Neuilly 1975.
- Fasler F.*: IBIS — Ein interaktives Bildinterpretationssystem für die Auswertung digitaler Daten. Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, 11 S., Freiburg i. Br. 1978.
- Geiser U. et al.*: Sri Lanka Rice Yield Forecasting with Landsat Imagery. Geogr. Institut Universität, 135 S., Zürich 1978.
- Gfeller R.*: Anwendungsmöglichkeiten von Infrarot-Wettersatellitenbildern für geographische Untersuchungen. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 86 S., Zürich 1972.
- Gfeller R.*: Untersuchungen zur automatisierten Schneeflächenbestimmung mit Multispektral-Aufnahmen des Erderkundungssatelliten ERTS-1. Diss. Universität Zürich, 95 S., Zürich 1975.
- Goodenough D. G. & Goldberg M.*: Automatic Field Classification. Abstract Proc. Int. Symp. on Image Processing, Interactions with Photogrammetry and Remote Sensing, 1 S., Graz 1977.
- Haberäcker P.*: Untersuchungen zur Klassifizierung multispektraler Bilddaten aus der Fernerkundung. Diss. Universität Berlin, 135 S., Berlin 1978.
- Haefner H.*: Snow Survey and Vegetation Growth in the Swiss Alps. EREP-Final Report to NASA, Nr. 323, 35 S., Zürich 1975.
- Haefner H.*: Snow Survey and Vegetation Growth in High Mountains (Swiss Alps). ERTS-1 Final Report to NASA, SR 323/IDF-405, 35 S., Zürich 1975.
- Haefner H.*: Snow Mapping and Land Use Studies in Switzerland. Landsat-2 Final Report to NASA, 54 S., Zürich 1977.
- Haefner H.*: Snowcover Monitoring by Aerial Photographs and Satellite Data. ISPR-Course: Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology, 50 S., Ispra (I) 1977.
- Holmes Q. A. & Nüesch D. R.*: Selection of a Seventh Spectral Band for the Landsat-D Thematic Mapper. Report to NASA, CR-ERIM 130100-4-F, ERIM, 94 S., Ann Arbor 1978.
- Holmes Q. A. & Nüesch D. R.*: Optimum Thermal Infrared Bands for Mapping General Rock Type and Temperature from Space. Report to NASA, CR-ERIM-130100-13-F, ERIM, 48 S., Ann Arbor 1978.
- Itten K. I.*: Geographische Interpretation von Wettersatellitenbildern. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 126 S., Zürich 1969.
- Itten K. I. et al.*: Weather Satellite Pictures for Earth Resources Studies. XIX Rass. Int. Eletr. Nucleare ed Aerospaziale, S. 365—375, Rom 1972.
- Itten K. I.*: Die Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei geographischen Untersuchungen. Diss. Universität Zürich, 109 S., Zürich 1973.
- Itten K. I.*: Approaches to Digital Snow Mapping with Landsat-1 Data. Paper Workshop on Oper. Applic. of Satellite Snowcover Observations, 13 S., South Lake Tahoe 1975.
- Itten K. I.*: Application of Digital Snow Mapping with ERTS-1 Data, Using the Stansort Image Processing System. NASA/GSFC, Nr. 75-1, 10 S., Greenbelt MD 1975.
- Itten K. I.*: Satellitenbilder und ihre Auswertung. Krieg im Aether, Folge XVII, S. 8-1-8-22, Bern 1978.
- Itten K. I.*: Snow Mapping from Space Platforms. Paper XXIIInd COSPAR Symp., 24 S., Bangalore, Indien 1979.
- Itten K. I. & Fasler F.*: Thematic Adaptive Spatial Filtering of Landsat Landuse Classification Results. Paper 13th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 8 S., Ann Arbor 1979.
- Kilpelä E. et al.*: Automated Earth Resources Surveys Using Satellite and Aircraft Scanner Data. Techn. Research Centre of Finland, Publ. 15, 174 S., Espoo 1978.
- Lichtenegger J.*: Analysis of Multitemporal Data. In: Haefner H.: Landsat-2 Final Report to NASA, 3 S., Zürich 1977.
- Lichtenegger J. et al.*: Methoden zur Überlagerung von Landsat-Bildern für multitemporale Landnutzungskartierungen. Bildmessung und Luftbildwesen 46/2, S. 53—61, Karlsruhe 1978.
- Lindenlaub J.*: Remote Sensing Analysis. Information Note 110471, Purdue University, 83 S., West Lafayette, Ind. 1972.
- Lyon R. J. P.*: Evaluation of ERTS Multispectral Signatures in Relation to Ground Control Signatures Using a Nested-Sampling Approach. Final Report to NASA, Stanford University, 222 S., Stanford 1975.
- Mahrer F.*: Abgrenzungsnormen zur Erfassung der Waldfläche im Schweizerischen Landesforstinventar. Berichte EAFV, Nr. 167, S. 29—53, Birmensdorf 1976.

- Martinez J.*: Snowmelt Runoff Model for Streamflow Forecasts. *Nordic Hydrology*, 6/3, S. 145—154, 1975.
- Martinez J.*: Possibilities and Obstacles in the Hydrological Exploitation of Satellite Data. *Int. Working Seminar on Snow Studies*, WMO, 5 S., Genf 1976.
- Matinez J. & Rango A.*: Discharge Forecasts in Mountain Basins Based on Satellite Snow Cover Mapping. Paper Final Workshop on Oper. Applic. of Satellite Snowcover Observations, NASA/GSFC, 16 S., Greenbelt MD 1979.
- Miller L. D. et al.*: Remote Sensing Inputs to Landscape Models which Predict Future Spatial Land Use Patterns for Hydrologic Models. Preprint X-923-77-115, NASA/GSFC, 41 S., Greenbelt MD 1977.
- Moik J. G.*: Introduction to Computer Image Processing. NASA/GSFC, X-650-73-287, 63 S., Greenbelt MD 1973.
- Mueller F.*: Das Schweizer Gletscherinventar als ein Beitrag zum Problem der Gletscher-Klima-Beziehung. *Geographica Helvetica* 28.2, S. 103—110, Bern 1973.
- Muri R.*: Automatische Trennung von Schnee und Wolken im Satellitenbild. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 146 S., Zürich 1976.
- NASA*: Advanced Scanners and Imaging Systems for Earth Observations. NASA Report SP-335, 604 S., Washington D. C. 1972.
- Nüesch D. R.*: Landnutzungsinterpretation mit Hilfe multispektraler Abtastverfahren. Diss. Universität Zürich, 96 S., Zürich 1977.
- Ødegaard H. A. & Østrem G.*: Application of Satellite Data for Snow Mapping. Final Report to NASA, Nr. 9—77, 61 S., Oslo 1977.
- Otterman J. et al.*: Surveying Earth Resources by Remote Sensing from Satellites. *Geophysical Surveys* 2, S. 431—467, Dordrecht (NL) 1976.
- Rango A. & Anderson A. T.*: Flood Hazard Studies in the Mississippi River Basin Using Remote Sensing. *Water Resources Bulletin*, Vol. 10, Nr. 5, S. 1060—1081, 1974.
- Rango A. & Itten K. I.*: Satellite Potentials in Snowcover Monitoring and Runoff Prediction. *Nordic Hydrology*, Nr. 7, S. 209—230, 1976.
- Rango A.*: The Use of Snowcovered Area in Runoff Forecasts. NASA/GSFC, X-913-77-48, 29 S., Greenbelt MD 1977.
- Seidel K.*: Digitale Bildverarbeitung. Techn. Bericht ETH, 54 S., Zürich 1976.
- Sørensen B. M.*: Remote Sensing of Water Quality in Natural Water Bodies from Satellite Aircraft. Proposal Com. Europ. Communities., JRC, 45 S., Ispra (I) 1975.
- Staenz K.*: Radiometrische Untersuchungen über das Reflexionsverhalten von Schnee. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 156 S., Zürich 1976.
- Staenz K.*: Atmosphärische Korrekturen von Multispektraldaten des Erderkundungssatelliten Landsat-2. Diss. Universität Zürich, 129 S., Zürich 1978.
- Stirnemann H.-P.*: Schneedecke und Schneegrenzzone — im Vergleich zwischen Luftbildern und Bodeninformationen. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 124 S., Zürich 1976.
- Sung Q. & Miller L. D.*: Land Use/Land Cover Mapping (1:25 000) of Taiwan, Republic of China by Automated Multispectral Interpretations of Landsat Imagery. Preprint S-923-77-210, NASA/GSFC, 168 S., Greenbelt MD 1977.
- Telespazio*: Format Specifications for Landsat MSS System Corrected Computer Compatible Tape. DPS-SES-NT/0230-02/200576, 40 S., Rom 1976.
- Trachsler H.*: Luftbild und Orthophoto als Datenquelle für geographische Informationssysteme. Diss. Universität Zürich, 146 S., Zürich 1974.
- Ulbricht K. A. & Hoppe P.*: Digitale Bildverarbeitung zum besseren Erkennen der Erdoberfläche in Marokko. DFVLR Nachrichten Nr. 21, S. 849—851, Oberpfaffenhofen (BRD) 1977.
- Urfer H.-P.*: Routinemäßige Schneekartierungen in hydrologischen Einzugsgebieten mit Landsat-Daten. Diplomarbeit Geogr. Institut Universität, 87 S., Zürich 1978.
- Williams D. L. & Haver G. F.*: Landsat-Derived Information as Input to a Forest Inventory System. Intralab Project 75-1, 36 S., Washington D. C. 1976.
- Wray J. R.*: Land Cover Maps and Statistics of the Washington Urban Area Prepared from Landsat Digital Data. U. S. Geological Survey, Reston Virg. 1978.

Abbildungsquellen

Die Ausschnitte aus der „Landeskarte der Schweiz“ wurden reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 28. 6. 1979.

Abb. 17 links stammt aus dem „Atlas der Schweiz“, Tafel 48 Landwirtschaft, Redaktion und Bearbeitung Prof. Dr. Ed. Imhof, Reproduktion: Bundesamt für Landestopographie Ausgabe 1977. Nachdruck mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 23. 10. 1980.

Reproduktion der Ausschnitte aus dem Luftbildmosaik „Zürich 1972“ mit Bewilligung des Militärflugdienstes.

Landsat-Multispektralscannerdaten (Abbildungen und Magnetbänder): NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, USA.

Dank

Die vorliegende Arbeit wurde ermöglicht durch die enge Zusammenarbeit mit einer Reihe von Institutionen und Personen. Namentlich danke ich

- Prof. Dr. H. Haefner vom Geographischen Institut der Universität Zürich, bei dem ich die in den USA begonnene Arbeit fortführen konnte
- Dr. L. Walter, Dr. Ch. C. Schnetzler und Dr. A. Rango sowie deren Mitarbeitern am NASA/Goddard Space Flight Center für die großzügige Unterstützung meines gesamten Projektes, speziell den Experimenten am LARSYS- und Image-100-System
- Prof. Dr. R. J. P. Lyon und Dr. F. Honey von der School of Earth Science der Stanford University in Kalifornien für die Ermöglichung der Arbeiten und die Beratung am Stansort-II-System
- Prof. W. F. Berg, Dr. K. Seidel und Dr. D. Funkhouser vom Photographischen Institut der ETH Zürich für deren Unterstützung und Rat beim Benützen des Optronics Photomation Gerätes zum Aufbelichten der Resultdaten
- Dr. F. Fasler vom Geographischen Institut der Universität Zürich für den Aufbau und die Implementierung des Interaktiven Bild-Interpretations-Systems IBIS, und die fruchtbare Zusammenarbeit
- Prof. Dr. S. Schneider und Dr. V. Kroesch von der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn-Bad Godesberg, für die Aufnahme des Manuskripts in diese Schriftenreihe sowie für die umsichtige Redaktion
- Frau E. Kupka für die Erstellung der Druckvorlage
- meiner lieben Frau, die meinen Untersuchungen stetiges Interesse und Verständnis entgegen brachte.

Klaus I. Itten

Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum

Schriftenfolge der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung

Heft 1

H. Müller-Miny: Natur und Kultur des Landes an der mittleren Warthe im Luftbild, 36 S., 14 Bilder, 5 Ktn., Remagen 1952, 6,— DM.

Heft 2

S. Schneider: Braunkohlenbergbau über Tage im Luftbild — dargestellt am Beispiel des Kölner Braunkohlenreviers. 62 S., 23 Bilder mit 11 Deckblättern, 2 Ktn., Remagen 1957, 9,50 DM (vergriffen).

Heft 3

C. Schott (Hrsg.): Das Luftbild in seiner landschaftlichen Aussage. 14 Beiträge einer Arbeits-Tagung des Zentralausschusses für deutsche Landeskunde im November 1958 in Remagen, 40 S., 47 Bilder, 4 Abb., 3 Ktn., Bad Godesberg 1960, 16,— DM (vergriffen).

Heft 4

H. G. Gierloff-Emden: Luftbild und Küstengeographie am Beispiel der deutschen Nordseeküste. 119 S., 49 Bilder, 12 Deckbl., 1 Kt., 22 Abb., Bad Godesberg 1961, 18,— DM (vergriffen).

Heft 5

D. Steiner: Die Jahreszeit als Faktor bei der Landnutzungsinterpretation auf panchromatischen Luftbildern. Dargestellt am Beispiel des schweizerischen Mittellandes. 81 S., 32 Abb., 12 Tabb., 10 Bilder, Bad Godesberg 1961, 12,— DM.

Heft 6

H. Haefner: Vegetation und Wirtschaft der oberen subalpinen und alpinen Stufe im Luftbild, dargestellt am Beispiel des Dischmatales und weiteren Teilen der Landschaft Davos, Schweiz. 117 S., 32 Bilder, 14 Karten, 3 Prof., 5 Abb. und 5 Tabb., Bad Godesberg 1963. 20,50 DM.

Heft 7

E. Schmidt-Kraepelin u. S. Schneider: Luftbildinterpretation in der Agrarlandschaft und Beispiele ihrer Anwendung aus dem Lande Nordrhein-Westfalen. 154 S., 71 Bilder, 27 Abb., Bad Godesberg 1965, 24,80 DM.

Heft 8

G. Lang: Die Ufervegetation des Bodensees im farbigen Luftbild. 74 S., 29 Bilder, 22 Abb., Bonn-Bad Godesberg 1969, 29,75 DM.

Heft 9

E. Plessl: Ländliche Siedlungsformen Österreichs im Luftbild. 44 S., 30 Bilder, Bonn-Bad Godesberg 1969, 11,55 DM.

Heft 10

W. Hassenpflug und G. Richter: Formen und Wirkungen der Bodenabspülung und -verwehung im Luftbild. 85 S., 67 Bilder, 7 Abb. und 4 Tabb., Bonn-Bad Godesberg 1972, 26,— DM.

Heft 11

Naturräumliche Gefüge im Luftbild, dargestellt an zehn ausgewählten Beispielen. Zusammengestellt in der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung unter Mitarbeit von S. Schneider u. a. 101 S., 25 Bilder, 12 Abb. und 3 Tabb., Bonn-Bad Godesberg 1973, 25,— DM.

Heft 12

Gewässerüberwachung durch Fernerkundung — Die mittlere Saar. Von S. Schneider, E. Dewes, A. Krause, V. Kroesch, D. Lorenz und G. Miosga. 71 S., 27 Bilder, 12 Abb., 8 Tabb. und 2 Tafeln, Bonn-Bad Godesberg 1974, 38,50 DM.

Heft 13

Gewässerüberwachung durch Fernerkundung — Der mittlere Oberrhein. Von S. Schneider, F. Ammann, E. Dister, D. Lorenz, G. Miosga, G. Philippi, H. Solmsdorf. 90 S., 40 Bilder, 22 Abb., 6 Tabb. und 8 Karten, Bonn-Bad Godesberg 1977, 33,— DM.

Heft 14

Gewässerüberwachung durch Fernerkundung — Digitale Aufbereitung und Auswertung von Thermalaufnahmen der Unterelbe und des Oberrheins. Von S. Schneider, V. Kroesch, N. Rüpke, G. Serwatzky und D. Wölpert. 56 S., 29 Bilder, 10 Abb., Bonn-Bad Godesberg 1979, 37,— DM.

Heft 15

Großräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten, dargestellt am Beispiel der Schweiz. Von Klaus I. Itten, 86 S., 51 Abb., 5 Tabb., Bonn-Bad Godesberg 1980.

**BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR LANDESKUNDE
UND RAUMORDNUNG**

SELBSTVERLAG-BONN-BAD GODESBERG

